



INRAE



Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles

Synthèse de l'expertise scientifique collective – Octobre 2022

Contacts :

Anaïs Tibi, INRAE, coordinatrice de l'expertise scientifique collective : anais.tibi@inrae.fr

Vincent Martinet, INRAE, co-pilote scientifique : vincent.martinet@inrae.fr

Aude Vialatte, INRAE, co-pilote scientifique : aude.vialatte@inrae.fr

Directeur de la publication : Guy Richard, directeur de l'expertise scientifique collective, de la prospective et des études

Pour citer ce document :

Tibi A. (coord.), Martinet V. (coord.), Vialatte A. (coord.), Alignier A., Angeon V., Bohan D.A., Bougherara D., Cordeau S., Courtois P., Deguine J-P., Enjalbert J., Fabre F., Fréville H., Grateau R., Grimonprez B., Gross N., Hannachi M., Launay M., Lelièvre V., Lemarié S., Martel G., Navarrete M., Plantegenest M., Ravigné V., Rusch A., Suffert F., Thoyer S. (2022). Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles. Synthèse du rapport d'ESCO. INRAE (France), 86 p.

Le présent document constitue la synthèse du rapport de l'Expertise scientifique collective (ESCO) sollicitée conjointement par les ministères de l'agriculture, de l'environnement et de la recherche. L'ESCO a été conduite par la Direction de l'Expertise scientifique collective, de la prospective et des études (DEPE) d'INRAE avec le soutien financier attribué par l'Office National de la Biodiversité, et selon les principes et règles de conduite établies par cette structure et disponibles sur le site internet d'INRAE.

Le contenu des documents produits dans le cadre de cette ESCo n'engage que la responsabilité de leurs auteurs. Le rapport dont est issue cette synthèse a été élaboré sans condition d'approbation préalable par les ministères ou par INRAE.

Couverture : Sacha Desbourdes, INRAE.

Photographie de couverture : Paysage agricole près de La Chapelle-sur-Coise (69590 - Rhône). ©INRAE (Marie-Christine LHOPITAL).



Direction de l'Expertise scientifique
collective, de la Prospective et des Études
(DEPE)

Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles

Synthèse du rapport d'Expertise scientifique collective conduite par INRAE

Octobre 2022

Sommaire

Introduction générale	5
1. Contexte et nature de la demande adressée à INRAE.....	5
1.1. Contexte de la demande	5
1.2. Objectif et périmètre de l'ESCo	7
2. Démarche et portée de l'Expertise scientifique collective	7
2.1. Principes de travail.....	7
2.2. Structuration de cette synthèse	10
Partie 1. Eléments de définitions.....	11
1.1. Bioagresseur, protection des cultures et régulation naturelle	11
1.1.1. Bioagresseur : des dégâts aux pertes économiques.....	11
1.1.2. La régulation naturelle dans les stratégies de protection des cultures	13
1.2. La diversification végétale des espaces agricoles	17
1.2.1. Augmenter la diversité intra-spécifique de la culture : mélanges variétaux, utilisation de variétés hétérogènes (paysannes, traditionnelles).....	18
1.2.2. Augmenter la diversité interspécifique du couvert cultivé : associations de cultures, installation de plantes de services dans la parcelle, agroforesterie.....	19
1.2.3. Augmenter la diversité temporelle de la végétation cultivée (rotation)	22
1.2.4. La diversité de la végétation semi-naturelle du paysage : haies, prairies permanentes, bosquets, etc.....	24
1.2.5. Gérer le niveau de diversité du paysage	28
Partie 2. Enseignements de l'expertise scientifique collective	29
2.1. Les effets de la diversification végétale sur la régulation naturelle des bioagresseurs, la biodiversité associée, la fourniture d'autres services écosystémiques et le rendement des cultures.....	32
2.1.1. Diversifier la végétation des parcelles et des paysages agricoles est un levier pour protéger les cultures ..	32
2.1.2. La diversification végétale est favorable à la biodiversité associée et aux services écosystémiques rendus aux agriculteurs et à la société	42
2.1.3. Les systèmes diversifiés présentent des niveaux de rendement souvent supérieurs aux systèmes peu diversifiés	50
2.2. Les conditions de déploiement de la diversification végétale des espaces agricoles à des fins de protection des cultures.....	52
2.2.1. La diversification végétale a des effets contrastés sur la rentabilité économique de l'exploitation à court terme	55
2.2.2. Pour favoriser la diversification végétale, des verrous sont à lever au sein des filières agricoles et dans les territoires	57
2.2.3. Les politiques publiques sont un déterminant clef du déploiement de la diversification végétale	61

Partie 3. Perspectives et besoins de recherches	69
3.1. Perspectives : diversification végétale des systèmes de culture et enjeux environnementaux	69
3.1.1. Quelle place peut avoir la diversification végétale dans la transition vers une agriculture sans pesticides ?	69
3.1.2. La diversification végétale des systèmes agricoles face au défi du changement climatique.....	70
3.1.3. Jusqu'à quel point diversifier ? Quelques préconisations issues de la littérature scientifique.....	71
3.2. Besoins de recherche et de travaux complémentaires pour combler les lacunes identifiées dans l'ESCo	72
Références citées	75
Annexe 1. Le tournant de la Politique agricole commune ouvrant la voie à la diversification végétale	81
Annexe 2. Composition du collectif de travail	85

Introduction générale

1. Contexte et nature de la demande adressée à INRAE

1.1. Contexte de la demande

Les impacts environnementaux et sanitaires de l'utilisation généralisée des produits phytopharmaceutiques¹ de synthèse ainsi que l'interrelation entre les modes de production agricole et les changements globaux majeurs (changement climatique, érosion de la biodiversité, changements d'occupation des sols) sont désormais bien établis par des synthèses scientifiques d'ampleur nationale et internationale². 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. Cette demande pour des modes de production alternatifs aux systèmes dits « conventionnels », dont l'usage d'intrants de synthèse (engrais et pesticides de synthèse) constitue la clef de voute, trouve un écho à la fois dans la communauté scientifique et les politiques publiques européennes et nationales.

La recherche académique s'est ainsi investie de façon croissante dans l'analyse de **modes de production économes en intrants** depuis le milieu des années 2000. S'appuyant notamment sur le cadre conceptuel des services écosystémiques popularisé par le *Millennium Ecosystem Assessment* (2005), un ensemble de travaux démontre la force des interactions entre pratiques agricoles, biodiversité et services rendus par cette dernière aux sociétés humaines (voir par exemple Le Roux *et al.*, 2008). L'étude « EFSE-écosystèmes agricoles » conduite par l'Inra a plus particulièrement mis en évidence le rôle clef de la nature et de l'organisation spatiale de la végétation dans la fourniture de tous les services qui sous-tendent la production agricole, parmi lesquels figure la régulation naturelle des bioagresseurs des cultures (Tibi et Therond, 2017). Plus récemment, l'analyse des intérêts de la diversification végétale des parcelles et des paysages agricoles³ fait l'objet d'un nombre croissant de travaux (tels que les projets européens rassemblés sous l'égide du Crop Diversification Cluster⁴).

En parallèle, un certain nombre de travaux adoptent comme point d'entrée l'exploration des **voies de sortie des pesticides**. L'étude « Ecophyto R&D » conduite par l'Inra (Butault *et al.*, 2010) a ainsi montré qu'une réduction de moitié de leur usage ne peut être atteinte sans une re-conception profonde et durable des systèmes de production. Plus récemment, des programmes de recherche de grande ampleur ont été lancés autour de cette question. Une alliance européenne pour la recherche « *Towards a Chemical Pesticide Free Agriculture* »⁵ a été mise en place en 2020 sous l'impulsion d'INRAE, regroupant aujourd'hui 34 organismes de recherche issus de 20 pays européens pour favoriser l'émergence de travaux et d'innovations transdisciplinaires. En France, le Programme Prioritaire de Recherche (PPR) « Cultiver et Protéger autrement »⁶, invitant la recherche à concevoir des systèmes de culture sans pesticides de synthèse, a été lancé en 2018. À noter qu'en tant que pilote de ce PPR, INRAE conduit un exercice de prospective qui proposera début 2023 des scénarios de transition de l'Union européenne vers des formes d'agriculture sans pesticides chimiques à l'horizon 2050⁷.

¹ Ci-après désignés « pesticides », incluant les produits de biocontrôle disposant d'une autorisation de mise sur le marché.

² Citons notamment l'Expertise scientifique collective INRAE-Iremer sur les impacts écotoxicologiques des pesticides (Leenhardt *et al.*, 2022), celle sur les effets des pesticides sur la santé (Inserm, 2021), ainsi que les différents travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES).

³ On entend ici par « paysage agricole » une mosaïque d'écosystèmes dans laquelle l'écosystème le plus représenté est dédié à la production agricole.

⁴ <https://www.cropdiversification.eu/>

⁵ <https://www.era-pesticidefree.eu/>

⁶ <https://www6.inrae.fr/cultiver-protoger-autrement/Le-Programme/Presentation>

⁷ <https://www6.inrae.fr/cultiver-protoger-autrement/Les-Outils-de-pilotage/Prospective-2050>

Dans la sphère publique, la demande sociétale pour une agriculture plus respectueuse de l'environnement est relayée par un ensemble de politiques publiques européennes et nationales qui fixent des objectifs de **réduction de l'usage des pesticides**, et promeuvent plus globalement une transition vers des **modes de production agricole plus diversifiés, remplaçant la biodiversité et les processus écologiques au cœur des facteurs de production**.

À l'échelle européenne, la Directive 2009/128/CE dite « SUD » (*Sustainable Use of Pesticides Directive*)⁸, en cours de révision à l'été 2022, impose à chaque État-membre d'élaborer un cadre général d'action visant à limiter l'utilisation des pesticides au sein de l'UE tout en incitant les agriculteurs à recourir « à la lutte intégrée contre les ennemis des cultures et à des méthodes ou techniques de substitution ». Plus récemment, le Pacte vert pour l'Europe (*European Green Deal*) lancé en décembre 2019⁹ fixe des cibles quantitatives à l'horizon 2030 par le biais de ses déclinaisons stratégiques pour l'agriculture (stratégie « de la ferme à la fourchette ») et la biodiversité (stratégie européenne pour la biodiversité) : ces cibles incluent la réduction de 50 % de l'usage des pesticides¹⁰, l'augmentation jusqu'à 25 % de la part des surfaces agricoles cultivée en agriculture biologique, et jusqu'à 10 % de celle occupée par des éléments à « haute diversité biologique » (bandes tampons, terres en jachère, haies, arbres non productifs, etc.) servant notamment de refuge aux ennemis naturels des bioagresseurs des cultures. La principale politique européenne qui doit être mobilisée à cette fin est la Politique agricole commune au travers de ses trois instruments environnementaux (la conditionnalité, les écorégimes et les mesures agro-environnementales et climatiques). Si elle ne se donne pas d'objectif explicite en termes de réduction des pesticides, la re-diversification des systèmes agricoles apparaît clairement comme un enjeu depuis sa réforme de 2014 (l'une des trois mesures du verdissement), et se trouve renforcée dans la future programmation.

En France, les objectifs de réduction de l'usage des pesticides sont portés par le Plan Ecophyto, né du Grenelle de l'environnement organisé en 2007, et qui constitue la déclinaison française de la Directive SUD. Son objectif initial, à savoir la réduction de moitié des usages de pesticides entre 2008 et 2018 (« Ecophyto 2018 ») n'ayant pas été atteint, les pouvoirs publics ont révisé ce Plan (« Ecophyto 2 » puis « 2+ ») et reporté son échéance à 2025. En complément, la loi d'Avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt (LAAF) adoptée en 2014 incarne le Projet Agro-Écologique pour la France (lancé en 2012). Outre l'introduction dans la loi de la notion de systèmes de production « agro-écologiques » (sans en préciser toutefois les caractéristiques), elle fixe comme objectif que 50 % des exploitations agricoles françaises soient engagées dans des pratiques agro-écologiques en 2025. Outre les politiques agricoles, la Stratégie nationale pour la biodiversité (qui traduit l'engagement de la France au titre de la Convention sur la diversité biologique) prévoit dans sa programmation 2022-2030 de favoriser la transition agro-écologique des modes de production agricole et systèmes alimentaires, et de faciliter la mise en place d'infrastructures agro-écologiques (dans une logique d'intégration des trames écologiques dans l'aménagement du territoire).

Enfin, des politiques ciblant d'autres enjeux peuvent avoir un impact sur la diversification des cultures et des paysages. Citons par exemple la Directive 91/676/CEE « Nitrates » – imposant l'implantation de bandes enherbées le long des cours d'eau –, les Directives 92/43/CEE « Habitats » et 2009/147/CE « Oiseaux » – visant le maintien de la diversité biologique des milieux, notamment de la fraction (semi-)naturelle des paysages – ou encore la Stratégie nationale sur les protéines végétales – favorisant l'introduction de légumineuses dans les rotations.

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 sur l'efficacité « au champ » de ce levier 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 (agroforesterie en milieu tempéré) et bon nombre sont perçues par certains acteurs – à tort ou à raison – comme peu efficaces ou trop contraignantes. Ces constats doivent être dépassés,

⁸ <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32009L0128:FR:HTML> consulté le 06/05/2022

⁹ https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr

¹⁰ Dans le cadre de la révision de la directive SUD, la Commission propose d'inclure cet objectif dans le futur règlement européen sur l'utilisation durable des pesticides, le rendant ainsi juridiquement contraignant au niveau de l'UE.

scientifiquement, techniquement et politiquement. Une vision réellement intégrative est donc nécessaire tant pour élaborer et mettre en œuvre des mesures opérationnelles et efficaces, que pour orienter la recherche vers les fronts de science les plus à même de répondre aux questions qui restent aujourd’hui ouvertes.

1.2. Objectif et périmètre de l’ESCo

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, **à la lumière des résultats scientifiques publiés, si la diversité végétale des espaces agricoles¹¹ peut favoriser la régulation naturelle des bioagresseurs, et ainsi contribuer à la protection des cultures.** Une telle synthèse de la littérature internationale doit également permettre, en croisant des regards disciplinaires issus des sciences biologiques et des sciences économiques et sociales, **d’analyser les freins et les leviers au développement de stratégies de protection des cultures fondées sur la diversification végétale** afin d’aider à définir les conditions d’accompagnement de leur adoption. Enfin, l’ESCo doit apporter un **éclaircissement sur le rôle de la diversité végétale dans la fourniture d’autres services écosystémiques** en synergie avec la régulation naturelle des bioagresseurs. Cette demande s’inscrit dans le cadre du plan Ecophyto 2+ et du PPR « Cultiver et protéger autrement ».

L’objectif principal de l’ESCo est de réaliser une synthèse des connaissances internationales disponibles pour évaluer dans quelle mesure la diversité de la végétation présente dans les parcelles et les paysages agricoles peut contribuer à la régulation naturelle des bioagresseurs et ainsi constituer un levier de gestion alternatif aux méthodes actuellement majoritaires basées sur l’utilisation de pesticides de synthèse.

Le champ de l’ESCo couvre toutes les échelles spatiales et temporelles à laquelle il est possible de déployer et/ou gérer la diversité végétale. Ainsi, à l’échelle de la parcelle, il s’agit de considérer le choix et le mode d’implantation des espèces et des variétés par l’agriculteur (mélanges variétaux ou d’espèces, bandes enherbées, plantes de service, etc.) ainsi que la dynamique temporelle de ces couverts végétaux (rotations). A l’échelle supra parcellaire (exploitation, paysage), les effets de la composition et de la configuration de l’ensemble de la végétation sont considérés, qu’il s’agisse de la portion cultivée (assolement, taille et forme des parcelles) ou semi-naturelle (nature et connectivité des infrastructures agroécologiques situées en pourtour des parcelles – telles que les haies ou les lisières – ou formant des îlots dans le paysage – bois, prairies permanentes, etc.).

Le périmètre de l’ESCo inclut tous les types de productions végétales de France métropolitaine et ultra-marine, qu’il s’agisse des grandes cultures (quelle que soit leur destination : alimentation humaine ou animale, usage industriel), des cultures pérennes (arboriculture, vigne) ou du maraîchage.

2. Démarche et portée de l’Expertise scientifique collective

2.1. Principes de travail

L’activité d’Expertise scientifique collective (ESCo) est développée depuis 2002 à INRAE (anciennement Inra). Elle se définit comme une **activité d’analyse et d’assemblage de connaissances produites dans des champs très divers du savoir, et pertinentes pour éclairer l’action publique.** Elle vise à mettre en évidence les acquis scientifiques, les points d’incertitudes, les lacunes et les questions faisant l’objet de controverses scientifiques. L’activité institutionnelle d’ESCo fait l’objet d’une charte nationale signée en 2011. L’ESCo ne fournit pas d’avis, ni de recommandations. Elle ne donne pas non plus de réponses pratiques aux questions qui se posent aux gestionnaires. Elle réalise un état des connaissances scientifiques le plus complet possible à travers une approche pluridisciplinaire associant sciences du vivant et sciences économiques et sociales. Elle identifie également les problématiques peu renseignées et pour lesquelles les besoins de recherche semblent prioritaires.

La coordination des opérations d’ESCo est assurée par la Direction de l’Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études (DEPE) d’INRAE, dans le respect d’une charte de l’Expertise Scientifique Institutionnelle. Les principes établis par la DEPE pour garantir la robustesse des conclusions du travail sont

¹¹ Désigne au sens large la parcelle, l’exploitation, le paysage dans lequel se situent les écosystèmes agricoles.

décrits dans un guide public¹². Ils reposent notamment sur la **compétence** et la **pluralité** des experts (sélectionnés sur la base de leurs publications scientifiques et provenant de divers instituts de recherche publics), l'**impartialité** du comité d'experts (qui repose sur l'examen des déclarations d'intérêt des experts par le comité de déontologie d'INRAE), la **transparence** concernant la méthodologie suivie et la **traçabilité** des actions et moyens mis en œuvre au cours de l'opération.

Un **comité d'une trentaine d'experts et de contributeurs scientifiques** aux compétences disciplinaires complémentaires (Figure 1) a été mobilisé par INRAE pour réaliser la présente ESCo. La liste des membres de ce comité d'experts figure en dernière page du présent document. Appuyé par deux professionnels de l'information scientifique et technique, les experts ont rassemblé les connaissances scientifiques publiées à ce jour sur les différentes questions adressées à INRAE et en ont extrait les éléments pertinents pour éclairer la décision publique. Deux **chargés de mission** ont également été recrutés durant l'ESCO pour réaliser des analyses complémentaires à celles produites par les experts.

Deux **professionnels de l'information scientifique et technique** ont appuyé le comité d'experts et les chargés de mission dans l'identification des références scientifiques et techniques nécessaires (Encadré 1), et ont réalisé une analyse bibliométrique du corpus final qui étaye le rapport scientifique.

Le comité d'experts était présidé par deux **responsables scientifiques** qui ont fixé les orientations scientifiques de l'ESCO, animé la production collective et pluridisciplinaire, et vérifié la robustesse et la cohérence scientifique des conclusions produites par les experts. La coordination générale de l'ESCO, la gestion logistique et financière du projet ainsi que l'organisation du colloque de restitution ont été assurés par une **équipe de la DEPE**.

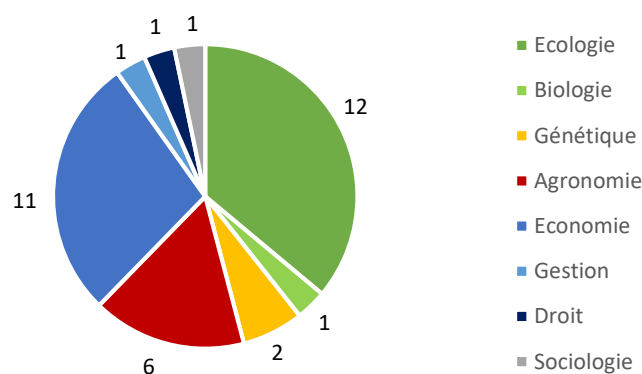


Figure 1. Compétences disciplinaires présentes au sein du comité d'experts

Les chiffres indiquent le nombre d'experts porteurs de chaque compétence disciplinaire. Certains experts sont pluridisciplinaires.

Trois livrables sont issus de l'ESCO. Les analyses produites par les experts sont d'abord rassemblées dans un **rapport scientifique** dans lequel figure la liste exhaustive des références étayant les conclusions (*cf. infra*). Ce rapport est placé sous la responsabilité du comité d'experts. À destination d'un public non scientifique mais averti, la présente **synthèse** a été rédigée à partir du rapport scientifique. Elle présente l'ensemble des enseignements de l'ESCO et constitue une clef de lecture du rapport. La synthèse est placée sous la responsabilité de la DEPE. Enfin, un **résumé** de 12 pages présente de façon la plus synthétique les grandes conclusions de l'ESCO, à destination d'un public cible. Le résumé est sous la responsabilité d'INRAE.

Un **Comité de suivi** animé par la DEPE s'est réuni à trois reprises pour assurer l'interface entre le collectif de travail et les ministères et veiller au bon déroulement des travaux. Il est composé de représentants des ministères de l'agriculture, de l'environnement et de la recherche, de la Direction scientifique « agriculture » d'INRAE, de l'Office français de la biodiversité (OFB) et du Comité scientifique d'orientation recherche-innovation (CSO RI) du Plan Ecophyto.

¹² <https://www.inrae.fr/actualites/quels-principes-inrae-conduit-il-expertise-ou-etude-scientifique-collective>

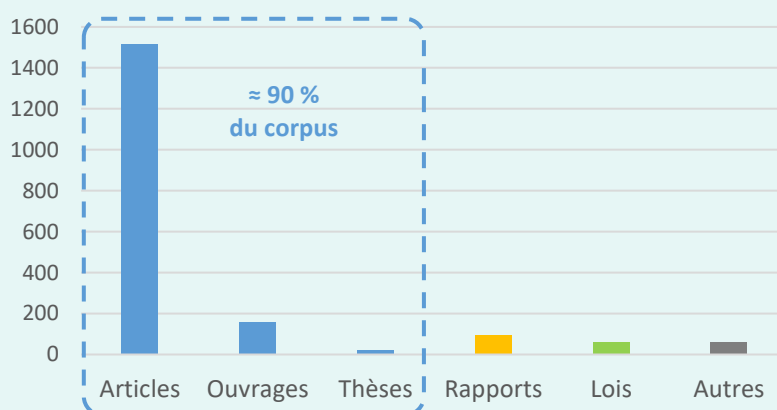
Un **Comité consultatif d'acteurs** animé par la DEPE, a également été réuni au démarrage et en fin d'ESCO pour informer les parties prenantes des orientations et des conclusions de l'exercice, et recueillir les préoccupations, intérêts et questionnements des acteurs au sujet de l'opération. En plus des membres du Comité de suivi, divers acteurs de la société susceptibles d'être concernés par les conclusions de l'exercice et d'en utiliser les résultats étaient conviés : acteurs des filières agricoles et alimentaires¹³, associations environnementales¹⁴, bureau d'études¹⁵ et acteurs du territoire¹⁶.

Encadré 1. Le corpus bibliographique de l'ESCO

Le rapport d'expertise est étayé par un corpus bibliographique d'environ 1 900 références, dont une partie (93) est citée dans cette synthèse. En interaction avec les experts, les documentalistes et la coordinatrice ont élaboré des requêtes propres à chaque thématique traitée dans l'ESCO, permettant d'interroger les bases de données bibliographiques (essentiellement le Web of Science, complété par Scopus pour les disciplines en sciences économiques et sociales)¹⁷.

Les milliers de références issues de ces interrogations ont été triées par les experts afin de ne retenir que celles permettant d'éclairer les questions de la saisine adressée à INRAE. Les experts ont également enrichi ce corpus avec des références non captées par interrogation systématique de ces bases (i) soit parce qu'elles n'y sont pas référencées (par exemple les références académiques issues de journaux non référencés dans ces bases et les documents non académiques utiles à l'ESCO tels que les textes de loi, certains rapports, etc.), (ii) soit parce qu'il s'agit de références plus génériques, dont l'objet d'étude dépasse les questions précises de la saisine, mais qui permettent d'enrichir l'ESCO en apportant des éléments de cadrage ou de discussion.

Le corpus final ainsi constitué est essentiellement composé d'articles scientifiques (environ 80 %) auxquels s'ajoutent des ouvrages et thèses scientifiques, ainsi que des rapports (tels que des rapports d'expertise scientifique ou des rapports de la Commission européenne), des textes de loi et d'autres types de références dites « grises » complétant la littérature académique sur les aspects non renseignés par cette dernière.



Nature des références composant le corpus final de l'Expertise scientifique collective

¹³ Association de coordination technique agricole (ACTA), réseau des Centres d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural (CIVAM), Fédération nationale des coopératives d'utilisation de matériel agricole (FNCUMA), La Coopérative agricole, Fédération nationale du négoce agricole, Union des industriels de l'agroéquipement (Axema), Association Nationale des Industries Alimentaires (ANIA).

¹⁴ Ligue pour la protection des oiseaux (LPO), Office Pour les Insectes et leur Environnement (OPIE).

¹⁵ Solagro (entreprise associative de promotion des pratiques et techniques économes en ressources naturelles - domaines : énergie, agriculture, forêt), Flor'insectes (bureau d'études, conseil en aménagement des couverts végétaux pour favoriser la biodiversité).

¹⁶ Agences de l'eau, Office national des forêts (ONF).

¹⁷ La dernière interrogation de ces bases a été réalisée fin 2021.

2.2. Structuration de cette synthèse

La présente synthèse est structurée en trois parties.

La première partie présente les **objets et concepts étudiés dans l'ESCO** : (i) la notion de bioagresseurs et les impacts de ces derniers sur les cultures, (ii) celle de régulation naturelle des bioagresseurs, en rupture paradigmatique avec les stratégies de lutte chimique¹⁸, et enfin (iii) les différentes modalités de diversification de la végétation des espaces agricoles, qui se distinguent les unes des autres selon le type de végétation concernée (cultivée ou semi-naturelle), la dimension temporelle de la diversification (à l'échelle de la saison culturale ou pluriannuelle) et l'échelle spatiale de son déploiement (parcelle, exploitation agricole, paysage).

La deuxième partie présente les **enseignements de la revue de littérature**, reposant sur l'analyse du corpus bibliographique présenté en section précédente. Ces enseignements sont structurés autour de six messages-clés :

- **La diversification végétale des parcelles et des paysages agricoles est un levier pour protéger les cultures.**
- **La diversification végétale est favorable à la biodiversité associée et aux services écosystémiques dont bénéficient les agriculteurs et la société.**
- **Les systèmes diversifiés présentent des niveaux de rendement souvent supérieurs aux systèmes peu diversifiés.**
- **La diversification végétale a des effets contrastés sur la rentabilité économique de l'exploitation à court terme.**
- **Pour favoriser la diversification végétale, des verrous sont à lever au sein des filières agricoles et dans les territoires.**
- **Les politiques publiques sont un déterminant clef du déploiement de la diversification végétale.**

Si la demande adressée à INRAE concerne en premier lieu une meilleure compréhension du potentiel qu'offre la diversification végétale pour la protection des systèmes de culture déployés en France métropolitaine, les systèmes ultra-marins présentent des spécificités (notamment biogéographiques, agronomiques, socio-économiques) justifiant une analyse spécifique dans l'ESCO, présentée dans l'encadré 2-3.

La troisième partie **prolonge les analyses bibliographiques** en mettant d'abord les conclusions de l'ESCO en perspective par rapport à deux questionnements : (i) la place des systèmes et paysages agricoles diversifiés dans une transition de grande ampleur de l'agriculture vers le zéro pesticides, et (ii) la contribution de la diversification végétale à l'adaptation et à l'atténuation du changement climatique. En complément, elle fait état des préconisations quantitatives formulées dans la littérature scientifique en termes de déploiement de certaines modalités de diversification végétale en réponse à un ensemble d'enjeux environnementaux (dépassant le seul objectif de la protection agroécologique des cultures). Enfin, elle fait état des besoins de recherches et de travaux complémentaires à conduire pour combler les lacunes de connaissances identifiées dans la littérature.

¹⁸ Employé ici pour désigner le recours à des pesticides.

Partie 1. Éléments de définitions

1.1. Bioagresseur, protection des cultures et régulation naturelle

1.1.1. Bioagresseur : des dégâts aux pertes économiques

Les bioagresseurs sont les organismes vivants causant des dégâts sur les plantes cultivées par leurs actions physiologiques ou mécaniques sur celles-ci. Ces dégâts peuvent se caractériser par une altération de la croissance et/ou de la vigueur de la plante, de sa morphologie ou de celle de ses organes (lésions, modification de couleur, déformations, nécroses, galles, etc.), ou encore de leur composition chimique (teneur en nutriments, présence de toxines, etc.). Ces dégâts peuvent entraîner des dommages aux récoltes (pertes quantitatives ou qualitatives¹⁹) et, en bout de chaîne, de pertes économiques.

Différentes catégories d'organismes sont susceptibles de causer des dégâts 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, phytoplasmes, etc.) à l'origine des maladies des plantes, gastéropodes, nématodes, oiseaux, mammifères (rongeurs, taupes, etc.). Certains agents pathogènes sont transmis aux plantes *via* des organismes vecteurs (insectes le plus souvent, mais aussi acariens, nématodes, mammifères, etc.). Bien qu'il ne cause pas toujours des dégâts sur les plantes, c'est généralement le vecteur qui est ciblé par les méthodes de protection des cultures, et que l'on assimile ainsi à un bioagresseur. Du fait des enjeux qui ont motivé cette ESCo, l'analyse porte essentiellement sur les catégories de bioagresseurs faisant l'objet d'une lutte chimique : plantes adventices et parasites, microorganismes pathogènes, et invertébrés de la micro-méso-macrofaune (arthropodes, nématodes, mollusques). Le Tableau 1-1 récapitule les types de dégâts provoqués par les bioagresseurs.

Les plantes adventices sont considérées à double titre dans l'ESCO. Outre leur statut de bioagresseur lorsqu'elles sont à l'origine de pertes de rendement (du fait de la compétition qu'elles exercent sur les cultures) et/ou d'une dégradation de la qualité des produits de récolte (présence de graines indésirables au sein de la récolte), les adventices font partie de la composante végétale des espaces agricoles. À ce titre, elles contribuent à la diversité végétale dont cette ESCo analyse le potentiel régulateur vis-à-vis des bioagresseurs.

Etablir l'ensemble de la chaîne de causalité entre présence (abondance) de bioagresseurs, occurrence des dégâts, niveau de dommages et niveau des pertes économiques associées n'est pas chose aisée (Figure 1-1).

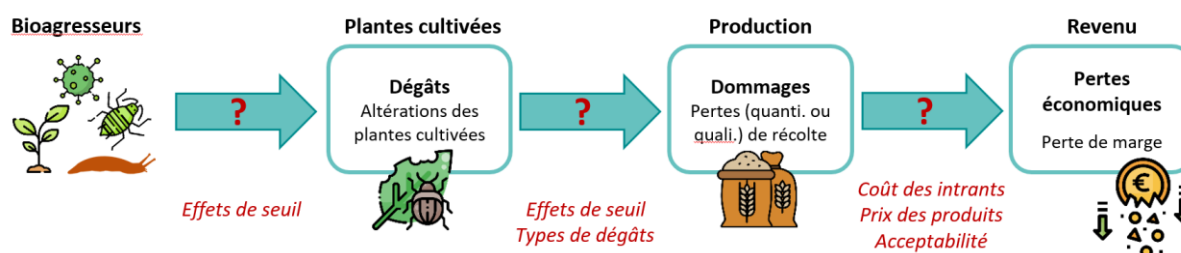





Figure 1-1. Conséquences en cascade de l'action des bioagresseurs sur les cultures.

Source : auteurs.

¹⁹ A noter que les pertes peuvent se produire après la récolte, durant le stockage, même si l'attaque du bioagresseur a eu lieu au champ (par exemple développement du mildiou sur les pommes de terre, ou de certaines maladies des fruits).

Tableau 1-1. Nature des dégâts et des dommages potentiels provoqués par les différents types de bioagresseurs

Type de bioagresseur	Dégâts (symptômes observables)	Dommages potentiels (pertes de récolte)
Agents pathogènes et organismes ravageurs 	Altérations métaboliques ou mécaniques induisant : <ul style="list-style-type: none"> - Une entrave à l'enracinement de la plante, à sa germination et au premier stade de la croissance ; - Une interruption partielle ou totale de l'absorption et/ou de la translocation de l'eau et des nutriments (des racines ou des feuilles vers les organes de stockages, les fruits ou les graines) ; - Un endommagement des parties vitales de la plante : organes de stockage, surfaces photosynthétiques, organes reproducteurs, structures de soutien → Altération de la croissance / vigueur de la plante cultivée, de la morphologie (lésions, modification de couleur, déformation, nécroses, galls, etc.), de la composition chimique (teneurs en protéines, en sucres, présence de toxines, etc.) des organes	Défaut de croissance de la plante cultivée et/ou détérioration des organes les rendant plus difficiles à récolter → perte de rendement. Déclassement des produits de récolte du fait de critères organoleptiques ou sanitaires non respectés → perte qualitative.
Plantes adventices (repousses et plantes spontanées) 	Compétition avec les plantes cultivées pour les ressources (rayonnement, eau, nutriments) → Altération de la croissance de la plante cultivée	Défaut de croissance de la plante cultivée → perte de rendement. Contamination de la récolte liée à la présence de graines d'adventices récoltées en même temps que la plante cultivée → perte qualitative.
Plantes parasites ²⁰ 	Détournement partiel ou total de l'eau et/ou des nutriments absorbés par la plante cultivée → altération de la croissance / vigueur de la plante cultivée	Défaut de croissance de la plante cultivée → perte de rendement.

La relation entre abondance des bioagresseurs et occurrence des dégâts n'est pas proportionnelle, notamment car il existe des effets de seuil pour certains bioagresseurs. De plus, le lien entre dégâts et dommages n'est généralement pas univoque. D'une part, tout dégât n'entraîne pas nécessairement des dommages (par exemple lorsque les dégâts ne concernent pas un organe récolté). D'autre part, le rendement et la qualité des récoltes sont des variables composites qui résultent d'un ensemble de facteurs en interaction parmi lesquels la satisfaction des besoins nutritifs et hydriques de la culture, rendant difficile l'identification et la quantification des seules pertes dues aux bioagresseurs.

Les estimations de dommages causés par les bioagresseurs sont éparpillées et ne concernent que les pertes quantitatives. Elles proviennent essentiellement des instituts techniques, qui réalisent des mesures de rendement dans le cadre d'essais contrôlés visant à évaluer l'efficacité de pesticides vis-à-vis de certains types de bioagresseurs, ainsi que de quelques articles scientifiques, proposant des estimations le plus souvent obtenues par modélisation. Ces pertes sont estimées par rapport au rendement potentiel (ou atteignable), niveau maximal de rendement qui peut théoriquement être atteint lorsque les plantes ne subissent aucun stress biotique²¹ ni abiotique²² (Figure 1-2).

²⁰ Plante qui vit et se développe au détriment d'une autre plante hôte (par exemple Orobanche du tournesol).

²¹ Ensemble des interactions entre organismes vivants : prédation, coopération, compétition, parasitisme, etc.

²² Facteurs physico-chimiques de l'écosystème : caractéristiques du sol, facteurs climatiques, chimiques, topographiques.

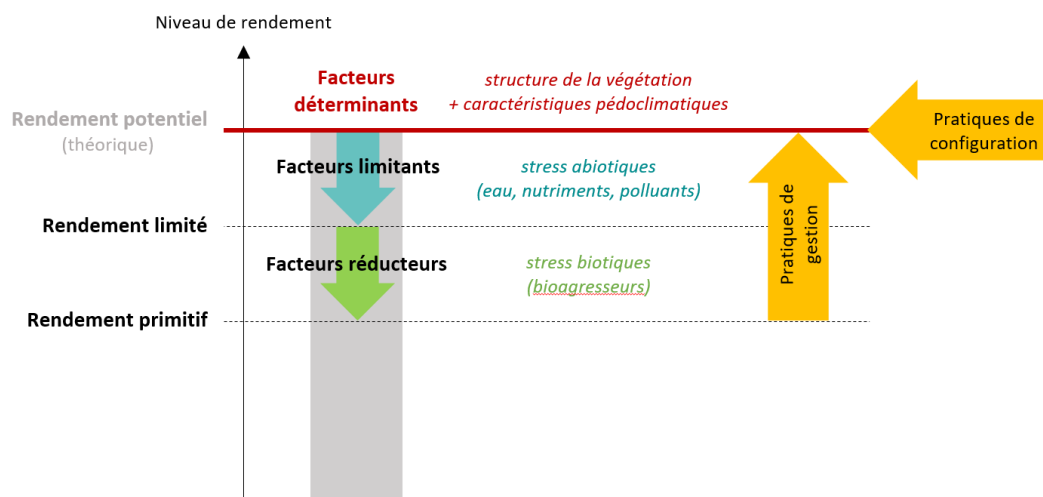


Figure 1-2. Les facteurs qui déterminent, limitent et réduisent le rendement des cultures.
Adapté de van Ittersum et Rabbinge (1997)

Les pratiques de configuration définissent la structure de l'écosystème : choix des géotypes végétaux (espèces, variétés), des dates et de la densité de semis, des séquences de culture. Les pratiques de gestion visent à limiter les stress abiotiques (par exemple irrigation, fertilisation) et réduire les stress biotiques (par exemple traitements pesticides).

Deux types d'estimations de pertes de rendement sont disponibles.

- La **perte potentielle** correspond à la perte que pourrait subir la culture **en l'absence de toute protection contre un bioagresseur**. Elle est en général estimée par une comparaison de parcelles traitées/non traitées chimiquement vis-à-vis d'un (ou d'une catégorie de) bioagresseur(s) donné(e), toutes autres choses égales par ailleurs et, dans les deux cas, conduites dans des conditions optimisées en termes de fertilisation et de traitements contre les autres bioagresseurs. Les pertes potentielles de rendement sont donc par construction surestimées, et doivent être considérées comme des valeurs théoriques maximales, puisqu'elles sont obtenues dans une situation théorique de retrait des pesticides, toutes choses égales par ailleurs (sans mise en place de modes de gestion alternatifs).
- La **perte réelle** correspond quant à elle à la perte subie **malgré la mise en place d'une stratégie de protection**, souvent chimique puisque les estimations disponibles concernent des systèmes conventionnels. Comparées aux niveaux de pertes potentielles, les estimations de pertes réelles donnent une indication de l'efficacité des méthodes de lutte actuellement employées pour maîtriser les bioagresseurs. Ces estimations sont toutefois entachées d'incertitude, dans la mesure où le rendement dépend également à l'état nutritif et hydrique de la culture, qui peut ne pas être optimal (contrairement aux essais décrits précédemment).

Le Tableau 1-2 récapitule les estimations de pertes potentielles et réelles collectées dans le cadre de l'ESCO.

Enfin, le lien entre dommage et perte économique n'est pas non plus automatique : un dommage n'induit une perte économique qu'à partir du moment où il entraîne une perte de marge pour l'agriculteur. Or, ce niveau de perte dépend d'un ensemble de facteurs socio-économiques tels que les caractéristiques du système de culture, le coût des intrants, les débouchés des produits de récolte, ainsi que de leur prix (qui peut augmenter lorsque les dommages touchent une partie significative de la filière, compensant en partie le manque à gagner sur la quantité). Des facteurs psychologiques et économiques (notamment financiers ou assurantiels) influencent également le niveau de perte acceptable pour l'agriculteur.

1.1.2. La régulation naturelle dans les stratégies de protection des cultures

La **protection des cultures** désigne les stratégies mises en œuvre pour empêcher ou réduire les pertes de récoltes causées par les bioagresseurs. Ces stratégies englobent à la fois les approches « curatives » et « préventives » (prophylaxie²³), et reposent sur divers types de pratiques et d'approches.

²³ <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/prophylaxie/>

Tableau 1-2. Ordres de grandeur des pertes moyennes annuelles associées aux bioagresseurs rapportés dans la littérature

Selon les sources, les pertes sont exprimées en valeur absolue ou en pourcentage du rendement atteignable (sauf mention explicite). Les estimations ne sont pas comparables entre elles du fait de la diversité des (catégories de) bioagresseurs considérés dans chaque étude.

Culture	Source	Pertes potentielles de rendement (en l'absence de toute protection contre un bioagresseur)	Pertes réelles de rendement (malgré la mise en place d'une stratégie de protection)
Blé	1	Adventices : 2,6 t/ha/an en moyenne sur 1993-2015	
	2	Maladies fongiques : 1,6 t/ha/an en moyenne sur 2002-2020	
	3	Tous bioagresseurs : 2 à 2,3 t/ha/an par rapport au rendement réel sur 1995-2012 (= 24,3 à 33% du rendement réel)	
	4	Tous bioagresseurs : 44 % sur 2001-2003 <i>Dont adventices : 18 à 29 % selon les régions</i> <i>Dont maladies : 12 à 20 % selon les régions</i>	Tous bioagresseurs : 14 % sur 2001-2003 <i>Dont adventices : 3 % (soit environ 0,25 à 0,30 t/ha/an)</i>
	5		Tous bioagresseurs sauf adventices : 0,5 t/ha/an sur 2009-2019 (soit 5 à 10 % selon les départements) <i>Dont septoriose : 0,2 t/ha/an</i>
	6		Tous bioagresseurs sauf adventices : 24,9% sur 2010-2014 <i>Dont : septoriose 5,5% ; rouille jaune 5,8% ; jaunisse nanisante 3,2% ; rouille brune 2,5% ; oidium 2,2% ; tan spot 1,9% ; fusariose 1,8%</i>
	7		Maladies fongiques : 0,8 t/ha/an sur 2004-2008 <i>Dont septoriose : 0,66 t/ha/an (le reste = rouilles, fusariose, oidium)</i>
Orge	2	Maladies fongiques : 1,51 t/ha/an sur 2002-2020	
	8	Maladies : 12 % sur 1996-1998	Maladies : 5 % sur 1996-1998
	5		Maladies fongiques : non significative sur 2009-2016
Maïs	9	Helminthosporiose : 0,6 à 0,8 t/ha/an Fusariose de l'épi : 1 à 1,4 t/ha/an	
Pomme de terre	9	Mildiou : 25 t/ha/an	Le dommage réel (notamment associé au mildiou) est difficilement estimable en raison des pertes après récoltes (pourriture des tubercules)
	6		Tous bioagresseurs sauf adventices : 9,8 % sur 2010-2014 <i>Dont : mildiou 3,2 % ; nématodes à kystes 3,1 % ; alternariose 1,3 %</i>
	4	Tous bioagresseurs : supérieure à 73 % sur 2001-2003	Tous bioagresseurs : 24 % sur 2001-2003
	10	Mildiou : 50 à 80 % sur 2006-2009 pour des variétés très faiblement à moyennement résistantes	
Colza	1	Adventices : 0,35 t/ha/an en moyenne	
	5		Maladies et insectes : 0,2 t/ha/an
Tournesol	1	Adventices : 0,41 t/ha/an en moyenne	

Références : 1. Cordeau *et al.*, 2016 (France – réseau Arvalis) ; 2. Arvalis, 2021a (France – réseau Arvalis) ; 3. Hossard *et al.*, 2015 (France) ; 4. Oerke, 2006 (Europe du Nord-Ouest) ; 5. Devaud et Barbu, 2019 (France) ; 6. Savary *et al.*, 2019 (Europe du Nord-Ouest) ; 7. Willocquet *et al.*, 2018 (France) ; 8. Oerke et Dehne, 2004 (Europe du Nord-Ouest) ; 9. Verjux *et al.*, 2017 (France – réseau Arvalis) ; 10. Rakotonindraina *et al.*, 2012 (France).

La stratégie aujourd'hui la plus fréquemment mise en œuvre est le contrôle des populations de bioagresseurs au moyen de la **lutte chimique** (recours à des pesticides), déployée sur la quasi-totalité des surfaces de grandes cultures (Figure 1-3 et Encadré 1-1). Outre les pesticides de synthèse, la lutte chimique inclut l'usage de certaines substances de biocontrôle²⁴, actuellement minoritaire bien qu'en croissance ces dernières années. La lutte chimique est la plupart du temps combinée avec le choix de **variétés peu sensibles voire résistantes aux bioagresseurs** (pour lutter notamment contre les maladies), ainsi que des méthodes de **lutte culturale** que sont le choix de la **rotation culturale**²⁵ (pour gérer les adventices, les maladies fongiques et bactériennes, les insectes ravageurs et les nématodes) et de la **densité de semis** (pour gérer les maladies fongiques).

Figure 1-3. Part des surfaces de grandes cultures traitées avec des pesticides en 2017

SAU : surface agricole utilisée

Source : Agreste (2021), d'après les données de l'enquête « Pratiques culturales » 2017 (ministère de l'agriculture)

Part (%) de la SAU traitée en 2017	Herbicides	Fongicides	Insecticides	Semences
Blé tendre	98	94	23	94
Blé dur	93	87	12	96
Orge	97	93	15	92
Triticale	81	59	4	76
Colza	99	94	92	80
Tournesol	93	8	14	85
Pois protéagineux	95	89	75	81
Maïs fourrage	98	0	4	92
Maïs grain	98	1	25	86
Betterave sucrière	100	96	19	97
Pomme de terre	99	100	57	75
Canne à sucre	98	0	2	///
Féverole	77	65	42	49
Soja	82	1	0	10
Lin fibre	100	85	87	93
Lin oléagineux	84	68	25	64

En rupture avec le paradigme de suppression des organismes bioagresseurs, l'idée qui sous-tend la **protection agroécologique des cultures** est de s'appuyer sur l'ensemble des processus biologiques/écologiques naturellement à l'œuvre au sein de l'écosystème agricole²⁶ afin de maintenir la population de bioagresseurs sous un seuil de nuisibilité (seuil au-delà duquel les dégâts entraînent des dommages). La **régulation naturelle des bioagresseurs** désigne la résultante de ces processus qui mobilisent les organismes vivants présents dans l'écosystème agricole²⁷ et la matrice paysagère, et agissent sur les flux et la croissance des populations des bioagresseurs.

La régulation naturelle des bioagresseurs est un service écosystémique dont l'agriculteur bénéficie au travers de la préservation du rendement et d'une diminution du recours (voire des coûts associés) aux pratiques de gestion des bioagresseurs²⁸. Par construction, la *réalisation* de ces processus dépend de la structure de l'écosystème agricole et de la matrice paysagère environnante (composition²⁹ et configuration³⁰ de la végétation notamment). En contribuant à définir la structure de l'écosystème, les pratiques telles que le choix des végétaux (espèces, variétés) implantés, des dates et de la densité du semis ou encore des séquences de culture sont donc susceptibles d'avoir un effet sur les processus impliqués dans la régulation naturelle des bioagresseurs.

²⁴ Le Code rural et de la pêche maritime (CRPM art L.253-6) définit le biocontrôle comme les « agents et produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Ils comprennent en particulier i) les macro-organismes et ii) les produits phytopharmaceutiques comprenant des micro-organismes, des médiateurs chimiques comme les phéromones et les kairomones, et des substances naturelles d'origine végétale, animale ou minérale. »

²⁵ Dans une moindre mesure que par le passé cependant, cf. Section 1.2.3.

²⁶ L'écosystème agricole désigne le compartiment biophysique de l'agroécosystème. Il correspond au système sol-plantes-animaux, incluant la biodiversité planifiée (cultures, animaux d'élevage) et associée (flore adventice, végétation semi-naturelle, faune sauvage) présente ou circulant dans cet espace tridimensionnel.

²⁷ La lutte biologique par introduction/lâchers d'organismes auxiliaires, qu'ils soient exotiques (acclimatation d'agents auxiliaires introduits) ou non (augmentation artificielle des populations endémiques par des apports extérieurs), n'est pas considérée dans l'ESCo comme faisant partie des régulations dites « naturelles ». Elle correspond à l'usage d'un intrant.

²⁸ La société bénéficie indirectement de ce service si son exploitation par les agriculteurs se traduit par une diminution du recours aux pesticides et, en conséquence, des pollutions associées (Tibi et Therond, 2017).

²⁹ Nature des organismes vivants (la biocénose) et de leur environnement non vivant (le biotope).

³⁰ Agencement spatial des composantes de l'écosystème.

Encadré 1-1. Utilisation de la lutte chimique en France

La Figure 1 classe les principales cultures présente en France selon le niveau de l'Indicateur de Fréquence de Traitement pesticide (IFT), qui traduit le nombre de doses de référence utilisées par hectare au cours d'une campagne culturale. Les cultures les plus consommatrices de pesticides à l'hectare sont l'arboriculture et le maraîchage, ainsi que la vigne et la pomme de terre. Si les grandes cultures sont globalement moins utilisatrices de pesticides à l'hectare, elles occupent les surfaces les plus importantes, notamment le blé tendre (5 millions d'ha soit près d'1/4 de la surface agricole utilisée hors prairies permanentes), le colza, l'orge, le maïs grain et le maïs fourrage (environ 1.4 million d'hectares chacune), et dans une moindre mesure le tournesol, la betterave industrielle et le triticale (respectivement 0.6, 0.4 et 0.3 millions d'hectare). Notons que cet indicateur traduit la fréquence d'usage des pesticides sans tenir compte toutefois de leur toxicité relative (un produit pouvant présenter un IFT faible mais une toxicité élevée). Par ailleurs, ces valeurs moyennes d'IFT à l'échelle nationale masquent une large variabilité spatiale des usages (Figure 2). A noter que le calcul de l'IFT total inclut le recours aux produits de biocontrôle (hors macro-organismes). Les substances naturelles (au premier chef desquelles le soufre) représenteraient 2/3 des ventes de produits de biocontrôle en 2019-2020 ; l'usage du biocontrôle (surfaces) est toutefois difficile à quantifier (Mamy *et al.*, 2022).

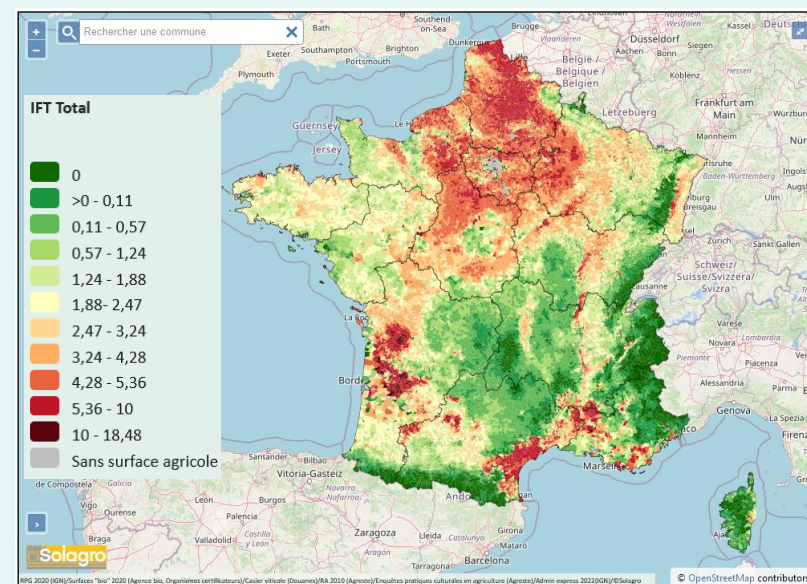
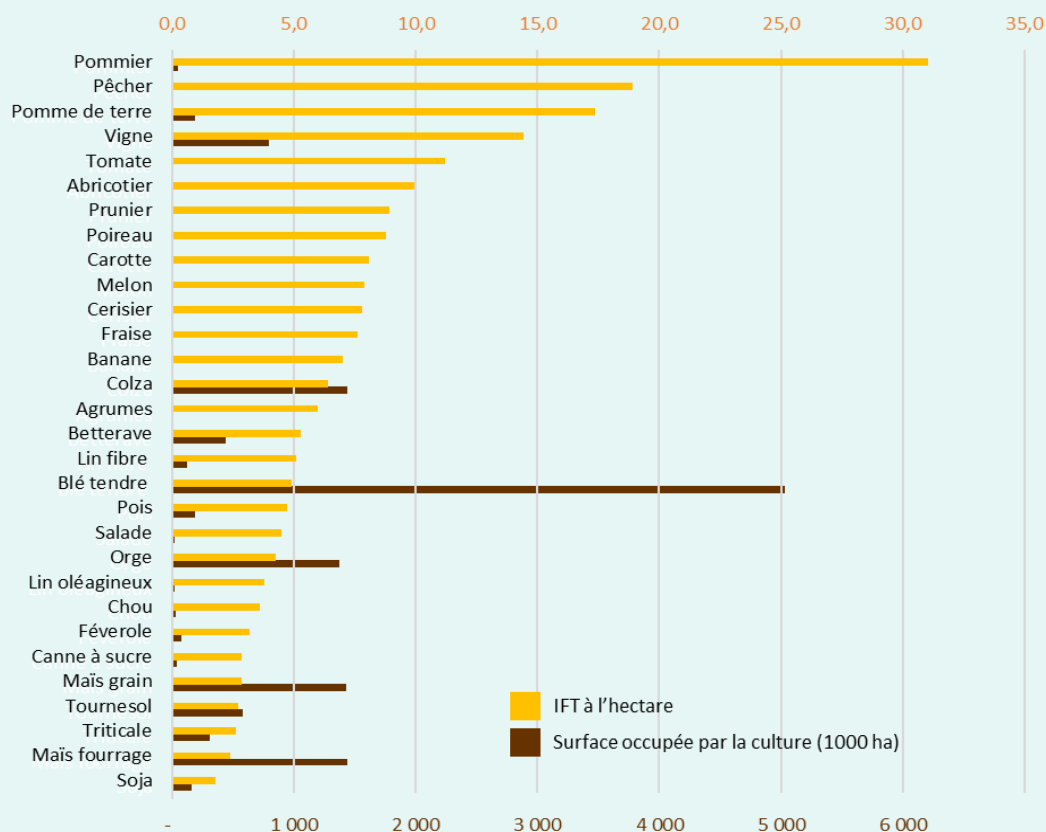


Figure 2. IFT total estimé par commune en France métropolitaine.
Source : Solagro – carte Adonis³¹

Figure 1. Classement de 30 cultures les plus cultivées en France (métropolitaine et ultramarine) selon l'indicateur de fréquence de traitement (IFT) qui leur est associé et leur surface cultivée
Source : données des enquêtes « pratiques culturales » du ministère de l'agriculture (grandes cultures : campagne 2017 ; légumes et arboriculture : campagne 2018 ; viticulture : campagne 2019).

³¹ <https://solagro.org/nos-domaines-d-intervention/agroecologie/carte-pesticides-adonis>

1.2. La diversification végétale des espaces agricoles

L'ensemble de la composante végétale des espaces agricoles est considéré dans l'ESCo. Cette composante englobe 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 (végétation spontanée présente au sein des parcelles (incluant la flore adventice) ou du paysage agricole).

Le terme de « **diversité végétale** » est utilisé dans l'ESCo pour désigner le niveau de diversité de la composante végétale sans considérer les origines de cette diversité (par exemple qui les met en place, pour quelles raisons et à quels coûts), ni son contexte de faisabilité (par exemple nécessité d'une offre variétale compatible ou contraintes réglementaires). Le terme de « **diversification (végétale)** » renvoie quant à lui à l'*action* (volontaire) d'augmenter le niveau de diversité végétale dans la parcelle et/ou le paysage (autrement dit diversifier par exemple en remplaçant un peuplement monovariétal/monospécifique par un mélange d'espèces/de variétés, en augmentant le nombre de cultures présentes dans la rotation ou encore le taux de végétation semi-naturelle dans le paysage). En conséquence, l'ESCo examine les effets écologiques et épidémiologiques de la *diversité végétale* sur les bioagresseurs, et analyse les conditions de déploiement de la *diversification*.

Etant donné le périmètre de l'ESCo, portant sur la diversification spatiale et temporelle de l'ensemble de la composante végétale des espaces agricoles, une large gamme de pratiques de diversification est prise en compte dans l'analyse bibliographique. Ces pratiques sont positionnées dans la Figure 1-4 selon le niveau de diversité végétale qu'elles impliquent et l'échelle spatiale de leur déploiement. Elles sont présentées ci-après en donnant, lorsqu'elles existent, des informations sur l'état actuel de leur mise en œuvre en France. Les données statistiques manquent cependant pour réaliser un état des lieux à la fois précis et complet du niveau de déploiement actuel de ces différentes pratiques.

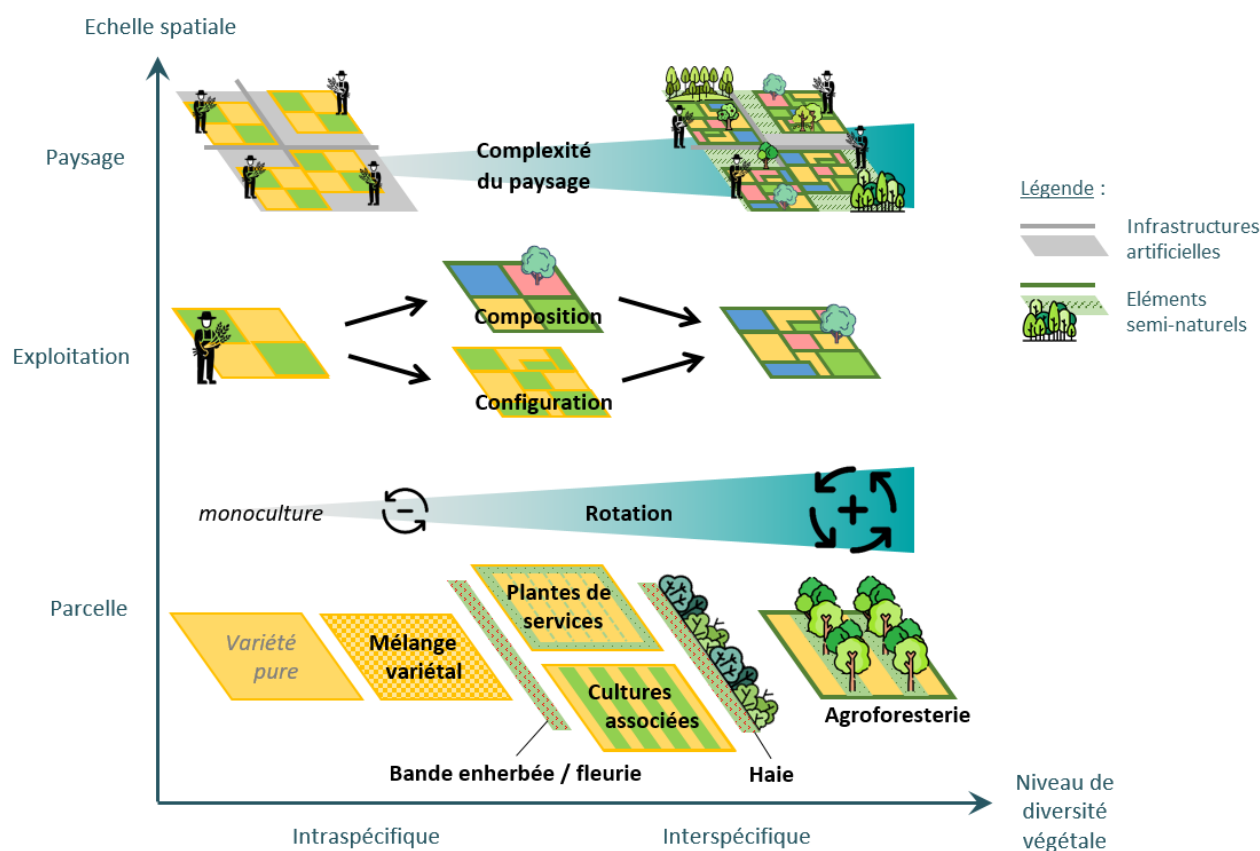


Figure 1-4. Représentation schématique des modalités de diversification végétale considérées dans l'ESCo
Source : auteurs.

1.2.1. Augmenter la diversité intra-spécifique de la culture : mélanges variétaux, utilisation de variétés hétérogènes (paysannes, traditionnelles)

Augmenter la diversité intra-spécifique consiste à augmenter la variabilité génétique du peuplement cultivé d'une espèce donnée, soit en semant simultanément plusieurs variétés (mélange variétal), soit en utilisant des variétés plus hétérogènes.

Une variété se définit classiquement comme une population de plantes obtenue par sélection à partir d'une espèce et dotée d'un ensemble de caractères communs. En France (comme en Europe), à l'exception des espèces mineures non réglementées (par exemple le petit épeautre), seules les semences des variétés certifiées par inscription au Catalogue officiel des espèces et variétés peuvent être commercialisées auprès des agriculteurs. Pour ce faire, une variété doit présenter des caractères phénotypiques (i) la distinguant des autres variétés, (ii) homogènes entre les individus qui la composent et (iii) stables de génération en génération (critères DHS pour distinction, homogénéité, stabilité). Du fait de ces critères, les variétés certifiées sont donc des populations de plantes possédant des génotypes identiques ou très proches.

En règle générale, les variétés non inscrites au Catalogue, soit parce qu'elles appartiennent à une espèce non réglementée soit parce qu'elles ne respectent pas les critères DHS, ne peuvent être commercialisées.

Les **mélanges variétaux** consistent à semer simultanément plusieurs variétés commerciales choisies pour la complémentarité de leurs traits agronomiques. Ils sont surtout utilisés par les agriculteurs pour réguler les maladies, en assemblant des variétés dont les résistances et/ou tolérances aux bioagresseurs sont complémentaires, créant ainsi un couvert dont le niveau de résistance « moyen » est adapté au complexe pathogène local. Les agriculteurs utilisent également les mélanges variétaux pour leur rusticité et le rendement plus stable qu'ils permettent d'obtenir face aux variations climatiques interannuelles.

D'après les statistiques nationales de déploiement variétal, les mélanges variétaux de blé (Figure 1-5) couvraient 12,2 % de la sole de blé en 2020 d'après FranceAgriMer (soit l'équivalent de la variété la plus cultivée)³², et 17 % en 2021 d'après Arvalis³³. Ces mélanges sont généralement composés de 2 à 3 variétés, choisies parmi celles les plus cultivées en pur dans les régions. Concrètement, c'est essentiellement l'agriculteur qui réalise lui-même le mélange à la ferme à partir de variétés pures, même si la commercialisation de mélanges prêts à semer est désormais autorisée en France (les Mélanges Moulin Soufflet proposés depuis 2018 en sont une illustration).



Figure 1-5. Mélange variétal de blé dur
©Hélène Fréville

Une autre forme de diversification intra-spécifique consiste à utiliser des **variétés traditionnelles ou paysannes** qui, par définition, présentent un certain niveau d'hétérogénéité génétique. Les variétés traditionnelles sont généralement des variétés dites « populations », constituées d'un ensemble d'individus aux génotypes variés, généralement sélectionnés au champ par des agriculteurs et multipliés en pollinisation libre. Leurs caractéristiques évoluent donc en fonction des variations des conditions environnementales locales. Les variétés paysannes sont issues quant à elles d'une sélection souvent plus récente effectuée par des agriculteurs à partir de variétés traditionnelles, d'anciennes variétés de pays ou encore de variétés anciennement commercialisées, récupérées et acclimatées à des conditions particulières, ou recombinaison avec d'autres variétés.

³² <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/65100/document/ENQ-CER-repvar-A20.pdf?version=1>

³³ Gérées par FranceAgriMer jusqu'en 2020, ces statistiques sont désormais produites par Arvalis. La valeur donnée pour 2021 est issue d'une enquête conduite par Arvalis sur la récolte 2021 auprès de 7000 agriculteurs. Elle varie de 6% à 32% des surfaces cultivées en blé tendre selon les régions.

<https://platform.api-agro.eu/members/s/5826ccef385c432c9266cc68ed82c76e>

Concernant plus spécifiquement l'Agriculture Biologique (AB), le nouveau Règlement européen (2018/848) intègre deux types de matériels génétiques caractérisés par une grande hétérogénéité pour répondre aux besoins de l'AB : le Matériel Biologique Hétérogène (MBH)³⁴ et les Variétés Biologiques Adaptées à la Production Biologique (VBAPB)³⁵. Ce dispositif réglementaire dont la mise en application est très récente devrait permettre de favoriser la diffusion, entre autres, des variétés traditionnelles ou paysannes, souvent utilisées par des agriculteurs en AB. Concrètement, les semences issues de MHB peuvent désormais accéder à la commercialisation à condition de respecter certaines exigences en matière de qualité de semences, de traçabilité des lots et d'étiquetage (dispositif en cours de mise en place depuis janvier 2022). La possibilité d'inscrire des VBAPB au Catalogue s'inscrit quant à elle dans la lignée de l'ouverture progressive de ce dernier, depuis 2010³⁶, à des variétés présentant des caractéristiques recherchées par les agriculteurs, les transformateurs et les consommateurs de produits biologiques.

1.2.2. Augmenter la diversité interspécifique du couvert cultivé : associations de cultures, installation de plantes de services dans la parcelle, agroforesterie

Par opposition à la culture dite pure, la diversification interspécifique du couvert cultivé consiste à cultiver simultanément au moins deux espèces végétales différentes au sein de la parcelle durant tout ou partie de leur cycle de croissance (on parle alors d'associations d'espèces).

Associations de cultures annuelles de rente

Lorsque toutes les espèces cultivées simultanément ont une finalité de production de biomasse ou de grains (cultures de rente), on parle **d'association/mélanges de cultures de rente (ou de cultures associées)**. Les cultures associées peuvent être semées en mélange sur le rang ou en rangs alternés (on parle dans ce dernier cas de cultures intercalaires). C'est le cas par exemple des méteils fourragers qui associent une ou plusieurs céréales (blé, triticale, avoine, seigle, orge) avec une ou plusieurs légumineuses annuelles (vesce, féverole, pois fourrager). Dans le cas où deux cultures associées ne partagent qu'une faible partie de leur cycle en commun (l'une étant semée en fin de cycle de la précédente), on parle de cultures en relais. L'une des principales raisons pour laquelle les agriculteurs mettent en œuvre des cultures associées est la recherche d'une production supérieure à celle de ses composantes cultivées en pures par l'atteinte d'un rendement globalement supérieur sur la même superficie cultivée (cf. Section 2.1.3).

Selon l'enquête d'Arvalis citée précédemment³⁷, les mélanges de cultures de rente représentaient 0,1 à 3 % de la sole selon les régions en 2021, constituées principalement des associations céréales et protéagineux (Figure 1-6).



Figure 1-6. Association blé pois
©Audrey Alignier

³⁴ <https://www.geves.fr/expertises-varietes-semences/agriculture-biologique/materiel-heterogene-biologique/>

³⁵ <https://www.geves.fr/informations-toutes-espèces/un-catalogue-de-varietes-pour-toutes-les-situations-de-production/agriculture-biologique-et-ctps/>

³⁶ Création d'un dispositif spécifique d'évaluation de variétés de blé pour l'AB.

³⁷ <https://platform.api-agro.eu/members/s/5826ccef385c432c9266cc68ed82c76e>

Installation de plantes de services durant le cycle de vie de la culture

Il est également possible d'associer une (ou plusieurs) culture(s) de rente à des **plantes secondaires (ou plantes de services)** qui n'ont pas vocation à produire un bien agricole mais à y contribuer en fournissant des services écosystémiques parmi lesquels la régulation des bioagresseurs³⁸. Ces plantes, semées en mélange, en rangs alternés avec la culture de rente ou en bandes (par exemple bandes fleuries ou enherbées), peuvent remplir des fonctions différentes. Elles sont qualifiées de **plantes compagnes** placées au voisinage immédiat des plantes cultivées (par exemple pour concurrencer les adventices, comme dans le cas de l'enherbement inter-rang en vigne – Figure 1-7), **plantes répulsives ou « push »** (qui repoussent certains bioagresseurs par la sécrétion de composés volatiles odorants), **plantes barrières** (qui limitent l'accès des ravageurs à la culture de rente par leur développement important), plantes pièges de bioagresseurs ou « pull » (qui attirent les bioagresseurs, les détournant de la culture de rente) ou **plantes banques d'insectes ou relai** (sur lesquelles se développent des organismes inoffensifs pour les cultures mais utiles aux ennemis naturels des bioagresseurs).

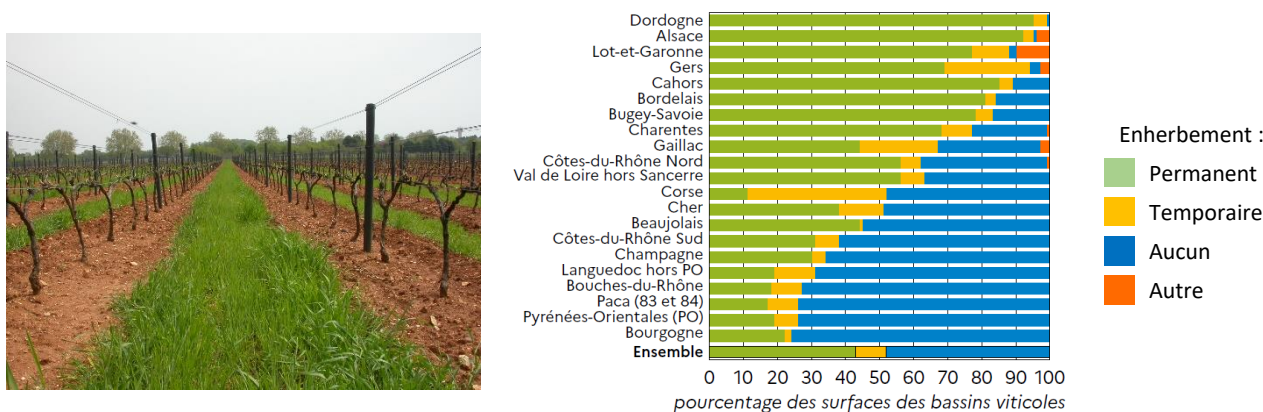


Figure 1-7. Pourcentage des surfaces des bassins viticoles concernées par un enherbement inter-rang en 2016

Sources : Photo ©INRAE 2022 (enherbement permanent de fétuque entre les rangs de vigne) ; Graphique Agreste (2021) d'après les données de l'enquête « Pratiques phytosanitaires en viticulture » 2016 (ministère de l'agriculture).

Agroforesterie

Enfin, l'**agroforesterie** désigne dans l'ESCo les systèmes associant une ou plusieurs espèces cultivées (annuelles ou pérennes) avec des plantes pérennes ligneuses au sein d'une même parcelle³⁹. Les systèmes agroforestiers recouvrent une très large gamme d'associations arbres/cultures.

En France métropolitaine (Figure 1-8), le système agroforestier traditionnel repose souvent sur l'**inclusion d'arbres fruitiers dans des prairies ou des parcelles cultivées**, les arbres étant exploités à la fois pour leurs fruits et leur bois. Introduits en France dès le XVIIe siècle, on rencontre encore ces systèmes en Normandie (pré-vergers ou vergers hautes-tiges, désignant des prairies plantées d'une faible densité d'arbres fruitiers, notamment des pommiers ou des poiriers, développés sur les surfaces impropres à la viticulture) ou dans le Dauphiné (noyeraies ou châtaigneraies avec cultures intercalaires telles que l'orge et le tournesol)⁴⁰. Des systèmes modernes se sont développés plus récemment (au stade de niche d'innovation), dans lesquels **tout type d'arbres (fruitiers ou forestiers, voire autre espèce ligneuse)** peut être intégré selon l'objectif de l'exploitant. Les arbres sont implantés en alignements séparés par des grandes cultures ou des cultures maraîchères (par exemple pêchers et cultures légumières, robinier et céréales), et leur densité varie entre 30 et 200 arbres par ha. Dans les territoires ultra-

³⁸ Les autres services recherchés par les agriculteurs sont notamment la captation de l'azote du sol et sa restitution à la culture suivante, l'augmentation de la biodiversité associée (notamment les pollinisateurs) ou encore la lutte contre l'érosion des sols et la préservation de leur fertilité.

³⁹ L'agroforesterie dite « bocagère », considérant l'association arbres/culture à l'échelle du paysage, relève dans l'ESCo de la diversité de la végétation semi-naturelle du paysage (section 1.2.4).

⁴⁰ Des systèmes agroforestiers existent également en milieu forestier, intégrant le plus souvent l'activité d'élevage (pré-bois en montagne, pâturage des truffières extensives). Ils ne sont pas considérés dans l'ESCo, qui se focalise sur les systèmes déployés sur des terres agricoles.

marins, l'agroforesterie prend la forme de **cultures sous ombrage** (comme la vanille, le cacao ou le café), de **jardins créoles et mahorais**, et autres **agro-forêts à multiples étages** (cf. Encadré 2-3).



Figure 1-8. Exemples de systèmes agroforestiers rencontrés en France : pré-verger (a) ; orge-noyer (b) ; légume-fruitier (c) ; jardin créole (d). Sources : ©INRAE (a, b et c) ; Marzin *et al.*, 2021 (d)

On dispose de peu de données quantitatives permettant d'estimer l'état actuel de développement de l'agroforesterie en France, mais les surfaces concernées sont aujourd'hui encore très minoritaires, et ce, malgré le Plan national de développement l'agroforesterie lancé en 2015 (dans la lignée du Projet agro-écologique pour la France). Le suivi est rendu difficile par la diversité des systèmes agroforestiers, non considérés en tant que tels par la statistique agricole, et par la définition fluctuante de l'agroforesterie selon les sources d'information, la plupart ne se limitant pas à l'agroforesterie intra-parcellaire et incluant le bocage (linéaires de haies – cf. *infra*). Concernant les systèmes agroforestiers traditionnels, les estimations varient d'une source à l'autre mais font état de surfaces **de l'ordre de 100 000 à 170 000 ha au milieu des années 2010** (rapport d'évaluation du Plan national de développement de l'agroforesterie, 2021 ; Dubois, 2016 ; CGAAER, 2015)⁴¹, alors qu'ils occupaient plusieurs centaines de milliers d'ha dans la première moitié du 20^e siècle⁴². L'extension des systèmes agroforestiers modernes est encore plus modeste. Les différentes sources disponibles convergent vers **une surface approximative de 3 000 ha**, essentiellement installés depuis 2010 (Dubois, 2016 ; CGAAER, 2015) et pour moitié en Agriculture Biologique.

A noter qu'un projet CASDAR (Compte d'affectation Spécial au Développement Agricole et Rural) dédié aux systèmes agroforestiers maraîchers⁴³, lancé en 2013, recensait plus de 130 sites agroforestiers (plantés ou en projet) dans toute la France, datant d'après 2010 pour la plupart. Un Réseau Mixte et Technologique (RMT) « AgroforesterieS »⁴⁴ a également été lancé en 2014. Parmi les actions à mener, le RMT devait mettre en place un observatoire national de l'agroforesterie, mais cet observatoire n'est pas encore en ligne.

⁴¹ Ces estimations sont bien supérieures à celles établies par Solagro (2009) sur la base de statistiques nationales d'occupation des sols, qui dénombre 54 300 ha de pré-vergers (soit 0,2 % de la surface agricole utilisée française) *au début des années 2000*.

⁴² <https://osez-agroecologie.org/contexte>
https://osez-agroecologie.org/images/imagesCK/files/syntheses/f659_concevoir-un-pre-vergersynthesetechnicosae-web.compressed.pdf

⁴³ Projet Casdar-SMART « Systèmes Mixtes Agroforestiers : création de Références Techniques & économiques »
<https://www.agroforesterie.fr/smart-casdar-maraichage-et-agroforesterie/>

⁴⁴ <https://rmt-agroforesteries.fr/>

1.2.3. Augmenter la diversité temporelle de la végétation cultivée (rotation)

L'utilisation de différentes cultures cultivées séquentiellement sur plusieurs saisons ou années, est une composante fondamentale de l'activité agronomique utilisée par les agriculteurs sous une forme ou une autre depuis au moins 6 000 ans. En effet, l'utilisation d'une combinaison de travail du sol et de rotations constitue la définition de l'agriculture arable (Glossaire Eurostat 2020⁴⁵), pratiquée dans le monde entier. Une rotation est une séquence fixe et spécifique de cultures, d'une durée donnée, conçue pour atteindre un ensemble particulier d'objectifs agronomiques, économiques et environnementaux. La performance agronomique des rotations repose sur la gestion de la fertilité et de la structure du sol, de l'eau et des adventices, maladies et autres bioagresseurs à laquelle contribue l'ensemble des cultures qui se succèdent (voir par exemple la revue de Struik et Bonciarelli, 1997). Les opportunités et contraintes agronomiques, économiques et environnementales fixent donc les limites des types de rotation qui peuvent être utilisés dans un contexte de production donné. A l'opposé, un raisonnement fondé uniquement sur le cours mondial des matières premières agricoles sans objectifs agronomiques et environnementaux stricts conduit à la mise en place de séquences simples (rotations courtes), qui ne peuvent être maintenues qu'avec des apports de pesticides et d'engrais.

Le développement des systèmes de rotation que nous connaissons aujourd'hui a eu lieu au cours du XX^e siècle. L'adoption des rotations s'est considérablement accélérée grâce à la révolution verte initiée dans les années 1950 (sélection des cultures, développement de la mécanisation, adoption de nouvelles pratiques agronomiques et développement de pesticides et d'engrais de synthèse pour favoriser la performance des cultures). Le changement structurel le plus récent dans la gestion des rotations a été l'adoption à grande échelle des cultures d'hiver dans les années 1960 et 1970. Au cours des récentes décennies, l'innovation en matière de rotation et son traitement en tant qu'objet d'étude ont décliné, en grande partie en raison du soutien des prix de certaines cultures commerciales et du développement de pesticides qui atteignent plus facilement les mêmes objectifs que les rotations. Depuis les années 1980, quelques cultures clefs ont fini par dominer, ce qui a conduit à une similarité croissante des modèles de culture dans toutes les régions du globe (Martin *et al.*, 2019).

Arvalis (Jouy et Wissocq, 2011) a analysé les résultats de l'enquête « Pratiques culturales » 2006 du ministère de l'agriculture, et mis en évidence que 34 grands groupes de rotations étaient pratiqués en France sur la période 2001-2005 sur les 14 000 parcelles enquêtées (soit environ 85 % des surfaces implantés en grandes cultures). D'après cette analyse (Tableau 1-3), les rotations de trois cultures étaient majoritaires sur cette période (55 % de la surface en grandes cultures considérée dans l'analyse). Les rotations supérieures à quatre cultures (cinq ou plus) ne ressortent pas de l'analyse, et les monocultures (essentiellement de maïs ou de blé) occupent à elles seules 12 % de la surface en grandes cultures.

Diversifier la rotation consiste à **modifier la séquence de cultures** (nature et ordre des cultures de rente) et/ou **d'introduire des cultures supplémentaires durant les périodes d'interculture (couvert d'interculture)**.

D'après l'enquête « Pratiques culturales » de 2017, 14 % des surfaces de grandes cultures étaient précédées d'un sol totalement nu pendant l'hiver en 2017 (en diminution de 6 points par rapport à 2011). Cette moyenne masque une diversité des situations selon les espèces cultivées : deux tiers des surfaces de soja et un peu plus de la moitié des surfaces de maïs grain restent nues en hiver. Lorsqu'un couvert d'interculture est mis en place, il s'agit dans 42 % des cas d'une crucifère, et dans 26 % des cas d'une légumineuse seule ou en mélange (Figure 1-10).

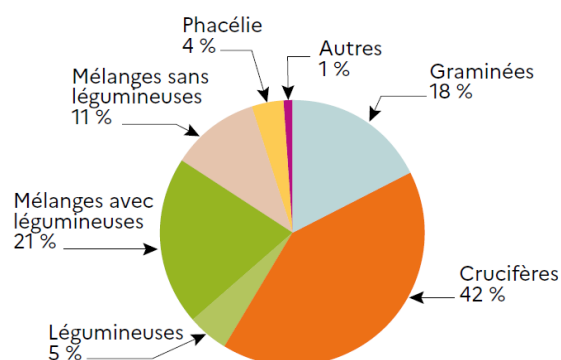


Figure 1-10. Nature des couverts hivernaux implantés en grandes cultures en 2017

Source : Agreste (2021) d'après les données de l'enquête « Pratiques culturales » 2017 (ministère de l'agriculture)

⁴⁵ <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>

Tableau 1-3. Les 34 principaux groupes de rotations pratiqués sur 10 Mha de grandes cultures en France durant la période 2001-2005. D'après Jouy et Wissocq (2011)

Les groupes sont identifiés par les cultures proportionnellement les plus présentes.

Source : Analyse des successions de culture 2001-2005 à partir de l'enquête « Pratiques culturales » 2006 du ministère de l'agriculture.

Zones géographiques	Groupes de succession de cultures (taux de présence des cultures dans la succession sur la période 2001-2005)	Surface couverte en 2006	
		hectares	% zone
Nord Champagne-Ardenne, Haute-Normandie, Nord-Pas-de-Calais, Picardie 2 608 000 ha	Betterave (18 %), blé tendre (50 %), pomme de terre (8 %)	719 000	28%
	Maïs fourrage (24 %), prairies artificielles (10 %), blé tendre (39 %), orge (13 %)	561 000	22%
	Colza (23 %), blé tendre (44 %), orge (23 %)	551 000	21%
	Blé tendre (43 %), orge (13 %), protéagineux (11 %)	254 000	10%
	Maïs grain (42 %), blé tendre (36 %)	200 000	8%
	Protéagineux (21 %), blé tendre (46 %), orge (16 %)	158 000	6%
	Betterave (22 %) blé tendre (39 %) Orge (30 %)	145 000	6%
	Maïs fourrage (100 %)	21 000	1%
Ouest Basse-Normandie, Bretagne, Pays-de-la-Loire, Poitou-Charentes 2 661 000 ha	Maïs fourrage (48 %), blé tendre (31 %), prairie temporaire (9 %)	1 016 000	38%
	Blé tendre (46 %), colza (13 %), orge (13 %), tournesol (21 %)	621 000	23%
	Blé tendre (40 %), maïs grain (40 %)	369 000	14%
	Prairie temporaire (79 %)	214 000	8%
	Maïs grain (88 %)	189 000	7%
	Légumes (13 %), blé dur (12 %), blé tendre (16 %)	132 000	5%
Est Alsace, Bourgogne, Franche-Comté, Lorraine, Rhône-Alpes 1 612 000 ha	Colza (18 %), blé tendre (40 %), orge (23 %)	578 000	36%
	Colza (32 %), blé tendre (35 %), orge (33 %)	383 000	24%
	Maïs grain (46 %), blé tendre (28 %)	273 000	17%
	Maïs fourrage (36 %), prairie temporaire (16 %), blé tendre (20 %)	267 000	17%
	Maïs grain (100 %)	111 000	7%
Centre Auvergne, Centre, Ile-de-France 2 011 000 ha	Colza (26 %), blé tendre (50 %), orge (17 %)	712 000	35%
	Blé tendre (47 %), orge (9 %), maïs grain (23 %), tournesol (10 %)	505 000	25%
	Blé tendre (32 %), maïs fourrage (12 %), orge (5 %)	239 000	12%
	Betterave (23 %), blé tendre (47 %), orge (20 %)	200 000	10%
	Blé tendre (49 %), orge (13 %), protéagineux (19 %)	193 000	10%
	Blé dur (37 %)	118 000	6%
	Maïs grain (95 %)	45 000	2%
Sud Aquitaine, Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées, Provence-Alpes-Côte d'Azur 1 118 000 ha	Blé tendre (39 %), tournesol (31 %)	307 000	27%
	Maïs grain (100 %)	298 000	27%
	Maïs grain (54 %), blé tendre (22 %)	161 000	14%
	Blé dur (64 %)	138 000	12%
	Blé dur (51 %), tournesol (49 %)	95 000	8%
	Prairies (temporaire à 50 %, artificielle à 18 %)	69 000	6%
	Maïs fourrage (64 %)	51 000	5%
France entière - 10 010 000 ha		hectares	% France
monoculture		1 185 000	12%
<i>dont maïs (grain et fourrage)</i>		715 000	7%
<i>dont blé dur</i>		256 000	3%
<i>dont prairie temporaire</i>		214 000	2%
2 cultures		1 594 000	16%
3 cultures		5 547 000	55%
4 cultures		1 687 000	17%

1.2.4. La diversité de la végétation semi-naturelle du paysage : haies, prairies permanentes, bosquets, etc.

La végétation semi-naturelle, désignée ci-après « éléments semi-naturels », est le plus souvent composée d'espèces bisannuelles, pluriannuelles ou pérennes. Les éléments semi-naturels incluent toutes les formes de végétation spontanée (ou initialement semées mais évoluant ensuite librement) située à l'intérieur de la parcelle, sur son pourtour et à l'extérieur de l'exploitation, qui contribuent à la diversité de la part non cultivée du paysage. La plupart ne reçoivent **aucun traitement phytosanitaire ni aucune fertilisation (chimique ou organique)**. Certains sont des éléments végétaux ponctuels (arbres isolés, éléments linéaires), d'autres ont une emprise surfacique plus importante (par exemple les surfaces toujours en herbe). Les éléments semi-naturels englobent donc une très grande diversité de types de végétation, dont la plupart sont désignés comme « infrastructures agro-écologiques » (IAE⁴⁶) par les politiques publiques (Figure 1-11) :

- toutes les formes de végétation plus ou moins spontanée située **en pourtour de parcelle** : les **haies** (éléments semi-naturels les plus emblématiques de paysages agricoles bocagers, et qui regroupent une diversité de linéaires de ligneux)⁴⁷, mais aussi les **bordures non productives boisées ou herbacées** qui se distinguent de la parcelle de terre arable à laquelle elles sont adjacentes⁴⁸ (par exemple bande tampon) et les fossés ;
- toutes les autres éléments situés à l'intérieur ou à l'extérieur de l'exploitation agricole, composées majoritairement de végétation spontanée (herbacée ou ligneuse) : les **arbres isolés**⁴⁹ (que l'on peut notamment trouver au sein des parcelles), les **jachères**⁵⁰, les **bosquets d'arbres**, les **lisières de forêt** et les **surfaces toujours en herbe**.



Figure 1-11. Exemples d'éléments semi-naturels : bocage (a) ; jachère fleurie (b) ; landes pâturées parsemées de tourbières (c).

Sources : ©INRAE (a, b) ; ©Anaïs Tibi (c)

⁴⁶ Dans leur acception politique, les IAE incluent des éléments non végétaux (mares, murs traditionnels), non considérés dans cette synthèse focalisée sur la diversification végétale. Ils incluent également les cultures fixatrices d'azote et les cultures dérobées. Les premières sont considérées dans l'ESCO au titre de la diversification des rotations car essentiellement implantées durant la période d'interculture. Les deuxièmes désignent le fait de semer une seconde culture de rente au moment de la récolte de la première mais dans la même saison culturale⁴⁶ : selon la durée pendant laquelle les deux cultures co-existent, les cultures dérobées sont considérées dans l'ESCO soit comme une modalité de diversification interspécifique du couvert de la parcelle (culture dite « relais »), soit comme une modalité de diversifier la rotation (culture intermédiaire).

⁴⁷ Une haie est définie dans la Politique agricole commune comme une unité linéaire de végétation ligneuse, d'une largeur inférieure ou égale à vingt mètres, incluant des arbustes et/ou des arbres et autres ligneux (ronces, genêts, ajoncs, etc.).

⁴⁸ Les bandes enherbées ou fleuries implantées par l'agriculteur à l'intérieur des parcelles, pour partie composées de végétation spontanée, sont considérées dans l'ESCO comme des plantes de service contribuant à la diversité interspécifique du couvert cultivé (cf. *supra*).

⁴⁹ Essences forestières seules, disséminées ou regroupées en bouquets de surface inférieure à 5 ares. Les alignements d'arbres situés au sein des parcelles relèvent essentiellement des systèmes agroforestiers, assimilés par la Politique agricole commune à des IAE, mais considérés dans l'ESCO en tant que forme de diversification interspécifique de la végétation cultivée (cf. *supra*).

⁵⁰ Les jachères sont définies dans la Politique agricole commune comme des surfaces agricoles ne faisant l'objet d'aucune utilisation ni valorisation pendant une période de six mois.

Les surfaces toujours en herbe méritent un point d'attention particulier. En France, du point de vue statistique et dans le cadre de la Politique agricole commune, cette notion est assimilée à celle de « **prairies permanentes** » qui désigne les surfaces enherbées de manière ininterrompue pendant au moins cinq ans (contrairement aux prairies dites « temporaires »)⁵¹. Ces surfaces ne font donc pas partie de la rotation des cultures, et se caractérisent par la limitation (mais non l'exclusion) des pesticides. Ce dernier point a pour conséquence que le peuplement végétal des prairies permanentes peut présenter une diversité spécifique très variable selon la nature du milieu et les pratiques agricoles associées, depuis une grande richesse d'espèces végétales spontanées à une diversité spécifique beaucoup plus pauvre dans les prairies conduites de manière plus intensive et recevant une fertilisation minérale élevée. On retrouve dans la littérature scientifique toute la diversité des couverts désignés comme « prairies », sans qu'il soit toutefois possible de circonscrire l'analyse aux seules prairies non fertilisées car le mode de conduite de ces couverts est rarement précisé. A ces prairies permanentes gérées (de façon plus ou moins extensive) par les agriculteurs s'ajoutent toutes les surfaces en herbe plus ou moins utilisées par l'élevage (pâture) mais non gérées : les **landes** et les **parcours d'estives**. Là encore, il est, la plupart du temps, difficile de distinguer spécifiquement ces dernières des prairies permanentes dans la littérature scientifique.

Par ailleurs, en tant que végétation spontanée entrant dans la composition du couvert de la parcelle, la flore adventice contribue à la diversité de la végétation semi-naturelle des espaces agricoles.

Les éléments semi-naturels peuvent aussi être distingués selon (i) le niveau de gestion par l'homme, (ii) leur caractère productif et (iii) leur emprise foncière sur l'espace agricole. Ces trois dimensions (gestion, productivité et emprise foncière) sont au cœur des décisions des agriculteurs en matière d'intégration de la végétation semi-naturelle dans la conduite de leur système de production.

Tous les éléments semi-naturels ne sont pas volontairement implantés ni gérés par l'agriculteur. Ainsi, la présence de certains bosquets, de certaines lisières de forêts ou encore de parcours d'estives est un fait indépendant des actions de l'agriculteur, bien que certains de ces éléments semi-naturels puissent être gérés par d'autres acteurs du territoire (par exemple des acteurs publics – collectivités territoriales, établissements publics tels que le conservatoire du littoral – ou privés sans statut agricole – tels que les conservatoires d'espaces naturels). Cette distinction a un impact sur la façon dont l'agriculteur peut considérer ces éléments de végétation dans la gestion de son exploitation. Pour les éléments semi-naturels que l'agriculteur a la possibilité de gérer, diversifier consiste à en planter de nouveaux⁵² pour restaurer une trame écologique ou augmenter la part de végétation non cultivée au sein de son exploitation, dans le but de bénéficier des services rendus par ces éléments semi-naturels (par exemple contrôle de l'érosion, régulation des flux de polluants, refuge pour la biodiversité, etc.). Concernant les éléments semi-naturels sur lesquels il n'a pas d'emprise, la « diversification » est plus indirecte et consiste, pour l'agriculteur, à tenir compte de la présence de ces éléments semi-naturels dans la conduite de son système de culture (par exemple choix des cultures situées à proximité de tel ou tel élément semi-naturel en fonction de ses bénéfices supposés vis-à-vis des bioagresseurs associés à ces cultures).

De plus, certains éléments semi-naturels peuvent être exploités par l'agriculteur à des fins de production de biomasse (en plus de bénéficier des services écosystémiques rendus). C'est le cas des surfaces en herbe pâturées ou fauchées ou de certaines haies fournissant du bois par exemple. Enfin, notons que certains éléments semi-naturels peuvent avoir une emprise foncière sur l'espace productif agricole (où se déploie la culture de rente), induisant donc potentiellement une perte de production.

On manque de recensement systématique et actualisé des éléments semi-naturels, catégorie incluant une grande diversité d'éléments qui ne font pas l'objet de statistiques dédiées.

⁵¹ La notion de « prairie naturelle » parfois utilisée (notamment par certains agriculteurs) n'est pas retenue dans l'ESCo car difficile à caractériser sur le plan scientifique. Les chercheurs considèrent en effet que la prairie naturelle n'existe pas sous les latitudes tempérées.

⁵² Ou de ne pas supprimer les existants.

Concernant les **linéaires de haies**, le Plan national de développement de l'agroforesterie (*cf. supra*) a cependant permis d'initier la création d'un dispositif national de suivi des bocages (DSB) articulant les compétences de l'Office français de la biodiversité (OFB) et de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN – Figure 1-12). En attendant la finalisation de ce dispositif, les données disponibles relatives aux haies sont disparates. Il est d'autant plus difficile d'avoir une vision d'ensemble que deux métriques sont utilisées pour quantifier ces infrastructures – le mètre linéaire et l'emprise spatiale (hectares) – sans qu'il n'existe d'équivalence claire et universelle permettant de passer de l'une à l'autre.

Ainsi, l'enquête annuelle Teruti-Lucas⁵³, réalisée par les services statistiques du ministère de l'agriculture, suit l'évolution de l'occupation et de l'usage des sols sur le territoire national. En se basant sur cette enquête, les sources rapportent une surface de haies et d'alignements d'arbres de l'ordre de 1 million d'ha en 2006, 960 000 ha en 2012 et 930 000 ha en 2015 (CGAAER, 2015 ; OFB, 2022). D'autres sources font état d'une perte de 1,4 millions de km de haies sur plus de 2 millions à la fin du XIX^e – début du XX^e siècle, avec un taux de perte passant de 45 000 km par an sur la période 1975-1987 à 15 000 km/an sur la période 1990-2007, pour s'établir durant la dernière décennie à environ 7 000 km/an (Dubois, 2016). À noter que le plan France Relance 2021-2022 ambitionne notamment de planter 7 000 km de haies et d'alignements d'arbres intra-parcellaires sur la période 2021-2022.

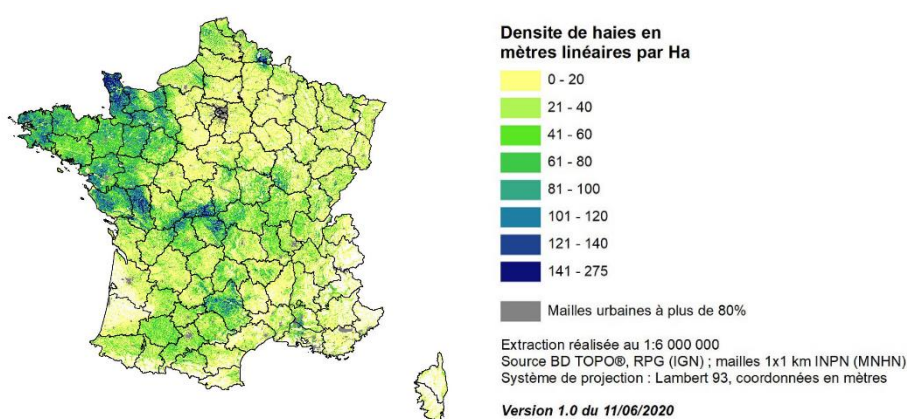


Figure 1-12. Carte de densité des haies en France métropolitaine

Source : Dispositif national de suivi des bocages IGN/OFB⁵⁴

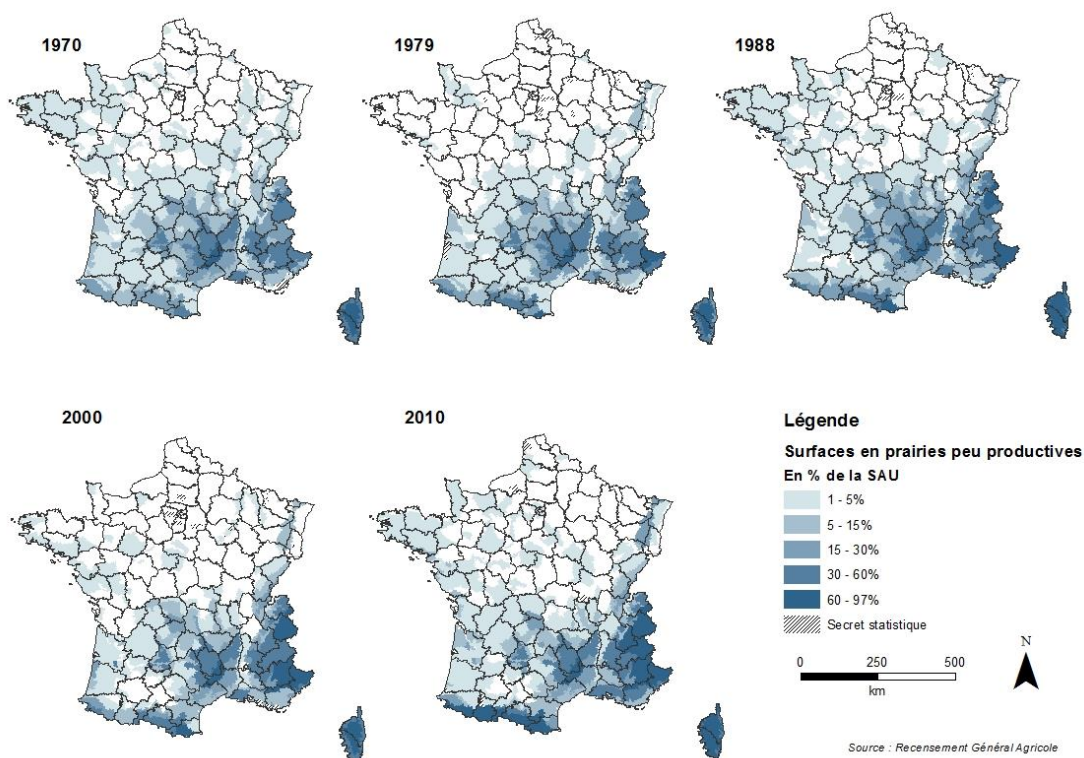
Les **surfaces en herbe** (prairies, landes, etc.) ont régressé en même temps que les haies sous l'effet des remembrements fonciers (15 millions d'hectares remembrés depuis 1945 d'après Dubois, 2016). D'après l'analyse des Recensements agricoles (RA) et de la Statistique agricole annuelle (SAA), elles sont passées de 41 % de la surface agricole utilisée (SAU) en 1970 à 28 % en 2010, alors que la proportion de terres arables passait de 56 % à 68 % (Therond *et al.*, 2017). Ces pourcentages à l'échelle nationale masquent cependant d'importantes disparités régionales du fait de la spécialisation des territoires et des assolements, les surfaces toujours en herbe occupant moins de 10 % de la SAU dans les zones de grandes cultures (Figure 1-13).

Enfin, à notre connaissance, l'état des lieux publié par Solagro d'après des statistiques nationales datant du début des années 2000 (Recensement agricole 2000, enquête Teruti 2003, enquête Prairies 1998) est le seul à considérer distinctement d'autres types d'éléments semi-naturels (Solagro, 2009). D'après cet état des lieux, les **bosquets** occupaient environ 530 000 ha (moins de 2 % de la SAU) il y a une vingtaine d'année, les **bandes enherbées** 390 000 ha, les **arbres épars ou en alignements** 225 000 ha, et les lisières herbacées des bois 85 000 ha.

⁵³ <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bases-donnees/teruti-lucas>

⁵⁴ <https://www.ofb.gouv.fr/haies-et-bocages-des-reservoirs-de-biodiversite>

a. Prairies permanentes peu productives



b. Prairies permanentes productives

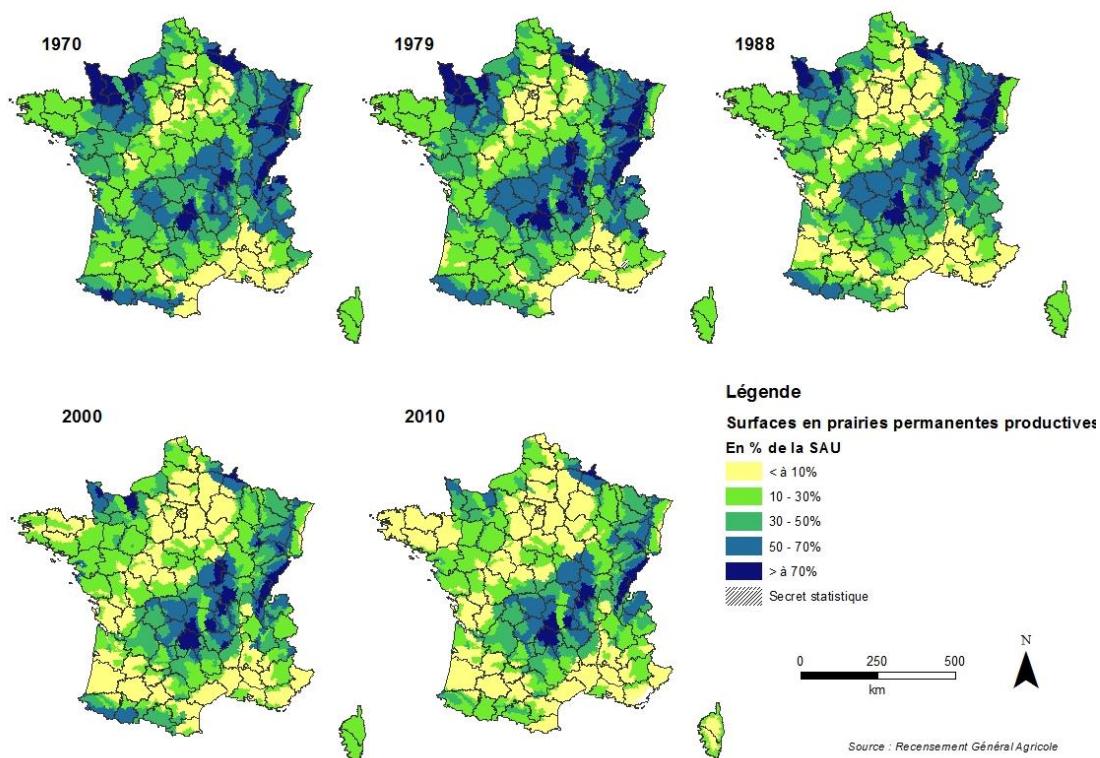


Figure 1-13. Evolution de la part des surfaces en prairies permanentes peu productives (a) et productives (b) dans la surface agricole utilisée par région agricole entre 1970 et 2010
 Source : Therond *et al.* (2017) d'après les Recensements agricoles

1.2.5. Gérer le niveau de diversité du paysage

Si c'est actuellement rarement le cas, la diversité de composition et de configuration du paysage (Figure 1-14) peut faire l'objet d'une gestion moyennant une coordination des acteurs parties prenantes de ce paysage. Pour ces raisons, elle est considérée dans l'ESCO comme une modalité de diversification à part entière.



Figure 1-14. Paysage agricole diversifié avec prairies, haies et bois
©Aude Vialatte

A l'échelle du paysage, le niveau de diversité de la végétation, tant dans sa composition (nature des cultures présentes dans l'assolement) que dans sa configuration (taille et forme des parcelles, répartition des cultures dans le paysage) est la résultante des choix individuels.

En premier lieu, la nature et **la répartition des cultures dans l'assolement** (à l'échelle de l'exploitation et plus globalement dans le paysage agricole) **résulte mécaniquement des choix de rotations** mises en place sur chaque parcelle. La diversité de l'assolement peut être appréciée à l'aide de l'indice de Simpson, tenant compte du nombre de cultures et de leur proportion relative dans l'assolement⁵⁵. L'indice de Simpson moyen par exploitation des cultures arables en France est de 2,47 (Figure 1-15 – Sirami et Midler, 2021⁵⁶). Pour plus de 85 % des exploitations agricoles, moins de quatre cultures couvrent plus de 80 % de la sole cultivée. En 2018, les dix assolements les plus représentés occupent 78 % de la SAU totale. Le blé tendre d'hiver occupe à lui seul 18 % de la SAU. La diversité de l'assolement peut également être caractérisée par la répartition spatiale des cultures des cultures dans le paysage (distance séparant deux parcelles portant la même espèce cultivée).

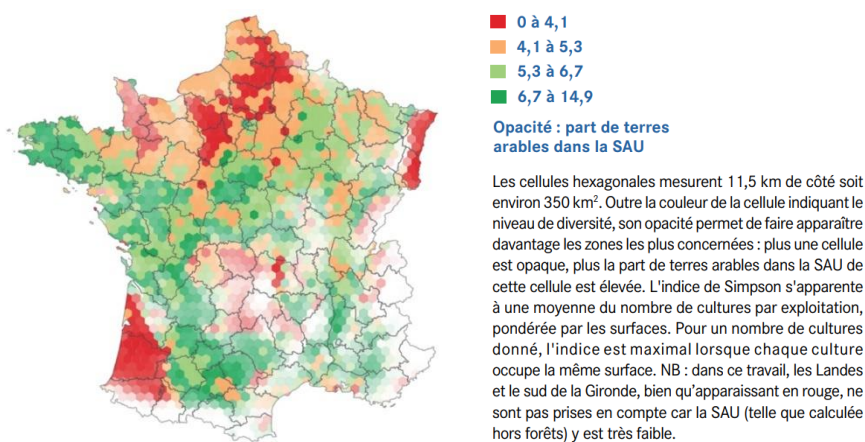


Figure 1-15. Diversité des cultures arables en France mesurée par l'indice de Simpson.

Source : Sirami et Midler, 2021.

En second lieu, la longueur des interfaces entre chaque parcelle et son environnement immédiat (autre parcelle agricole ou surface dédiée à un autre usage) est par construction liée à la **taille des parcelles**. Un paysage composé de parcelles de petite taille verra mathématiquement la proportion de ces interfaces augmenter, et donc celles des éléments semi-naturels qui leur sont associés, le cas échéant. De façon connexe, une modification de la taille des parcelles induit une modification de la diversité des assolements puisque qu'elle implique très souvent un changement de couvert.

⁵⁵ Pour un nombre de cultures donné, l'indice est maximal lorsque chaque culture occupe la même surface. Cet indice représente le nombre théorique minimal d'espèces qu'il faudrait cultiver de manière équilibrée dans la ferme pour avoir la même diversité d'assolement.

⁵⁶ <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Ana163/detail/>

Partie 2. Enseignements de l'expertise scientifique collective

Introduction

Pour répondre à la saisine adressée à INRAE par les ministères de l'agriculture, de l'environnement et de la recherche, l'ESCO a adopté un cadre conceptuel multi-échelles représentant un système socio-écologique agricole, associant une composante socio-technico-économique (en bleu) et une composante agroécologique (en orange) en interaction (Figure 2-1 – Vialatte *et al.*, 2022). La composante socio-technico-économique englobe l'échelle fine de la parcelle agricole, et celle de l'exploitation agricole, auxquelles les décisions de l'agriculteur se déploient. Cette composante concerne également l'échelle du territoire, où se développent les réseaux d'acteurs qui influencent les pratiques agricoles et les décisions individuelles. Elle intègre donc les filières (en amont et en aval de la production agricole), ainsi que le paysage institutionnel (cadre réglementaire et politique), économique (marchés) et social. La composante agro-écologique se déploie depuis le niveau des organismes mobilisés dans la régulation des bioagresseurs des cultures (plantes, bioagresseurs, ennemis naturels) jusqu'à l'aire biogéographique dans laquelle s'intègre le paysage agricole (dont la biocénose⁵⁷ dépend des filtres exercés par la disponibilité des ressources offertes par la mosaïque d'habitats ainsi que des pratiques agricoles mises en œuvre). Le fonctionnement du système ainsi constitué peut être influencé à plus ou moins long terme par des grands facteurs de changement tels que le changement climatique et les invasions biologiques, par exemple.

Ce cadre décrit le fait que les actions mises en œuvre par les agriculteurs au niveau des exploitations agricoles résultent (i) des possibilités et contraintes technico-économiques liées aux caractéristiques des exploitations et de leur environnement pédoclimatique, à leur insertion dans des filières et au contexte économique, socio-culturel et institutionnel d'une part, et (ii) du contexte agroécologique lié aux dynamiques écologiques au sein des écosystèmes environnants (notamment agricoles) d'autre part. Les actions des agriculteurs façonnent le paysage et les écosystèmes, et influencent les dynamiques écologiques en retour, ce qui peut modifier les fonctions rendues par ces écosystèmes, et donc le contexte des décisions de l'agriculteur, générant des boucles de rétroaction qui doivent être prises en compte dans la manière de penser la place que la diversification peut avoir dans la protection des cultures.

Le paysage agricole est au centre du cadre conceptuel ①. D'un point de vue socio-économique, il résulte d'un ensemble de choix d'usage des sols attribuant une vocation aux différentes surfaces (agricole, forestière, naturelle), la vocation agricole dominant les autres. D'un point de vue écologique, il se définit comme une mosaïque d'habitats en interactions.

Chaque parcelle agricole de ce paysage est composée d'une végétation cultivée et d'une végétation semi-naturelle qui évoluent dans le temps, notamment du fait de la rotation des cultures. À cette échelle, la diversification de la végétation correspond aux mélanges de variétés, aux associations d'espèces et à l'implantation d'habitats semi-naturels comme les haies, les bandes enherbées, les bandes fleuries, etc. ainsi que l'allongement de la rotation (1a). La végétation de la parcelle est colonisée par différents organismes interagissant entre eux et avec les plantes cultivées (1b). Parmi ces organismes, ceux qui utilisent les plantes cultivées comme des hôtes et sont à l'origine de dégâts pouvant porter préjudice à la production agricole sont qualifiés de bioagresseurs. Leurs prédateurs sont quant à eux qualifiés d'ennemis naturels. Les pratiques agricoles mises en œuvre au sein de la parcelle affectent les dynamiques de populations et de communautés de ces organismes, mais sont également ajustées au cours du temps, notamment pour prendre en compte ces dynamiques (par exemple, les pullulations).

L'ensemble de ces parcelles et habitats fournit un certain nombre de ressources à la composante agro-écologique du paysage ②, soutenant des réseaux d'interactions écologiques plus ou moins diversifiés ③ en fonction notamment du pool d'espèces dans la zone biogéographique considérée ④. Ces réseaux assurent des fonctions écologiques ⑤ qui peuvent être à l'origine de services écosystémiques (comme la régulation des bioagresseurs, la pollinisation, la régulation de l'eau, etc.) pour la composante socio-économique du paysage et qui peuvent soutenir la production agricole, ou être source de disservices qui peuvent au contraire la limiter ⑥.

⁵⁷ Ensemble des êtres vivants co-existants dans un espace écologique donné.

Les mouvements des organismes dans l'espace et les flux de matière impliquent l'interdépendance des exploitations agricoles pour une partie de ces services et disservices ⑦. Les agriculteurs mettent en œuvre des modalités de gestion des parcelles en réponse aux niveaux de services et disservices observés, mais surtout sous l'influence de motivations économiques et non-économiques qui peuvent être liées aux filières amont ⑧ et aval ⑨ dans lesquelles leur activité productrice s'inscrit, aux politiques publiques engagées par les institutions, aux dynamiques de marché (locaux et globaux) et aux attentes sociales des pairs et des concitoyens ⑩.

Tous ces niveaux d'organisation conditionnent les choix des agriculteurs dans l'espace et dans le temps, notamment en matière d'espèces (et variétés) végétales implantées dans la parcelle et de stratégies de protection des cultures ⑪. Le fait de diversifier les assolements et les rotations influence en retour la composante écologique du paysage, donc son fonctionnement, et donc les services écosystémiques associés, qui ont un effet en cascade sur les performances du système de production. Les deux composantes agroécologiques et socio-technico-économiques sont donc fortement liées et s'influencent de façon dynamique dans des boucles de rétroaction.

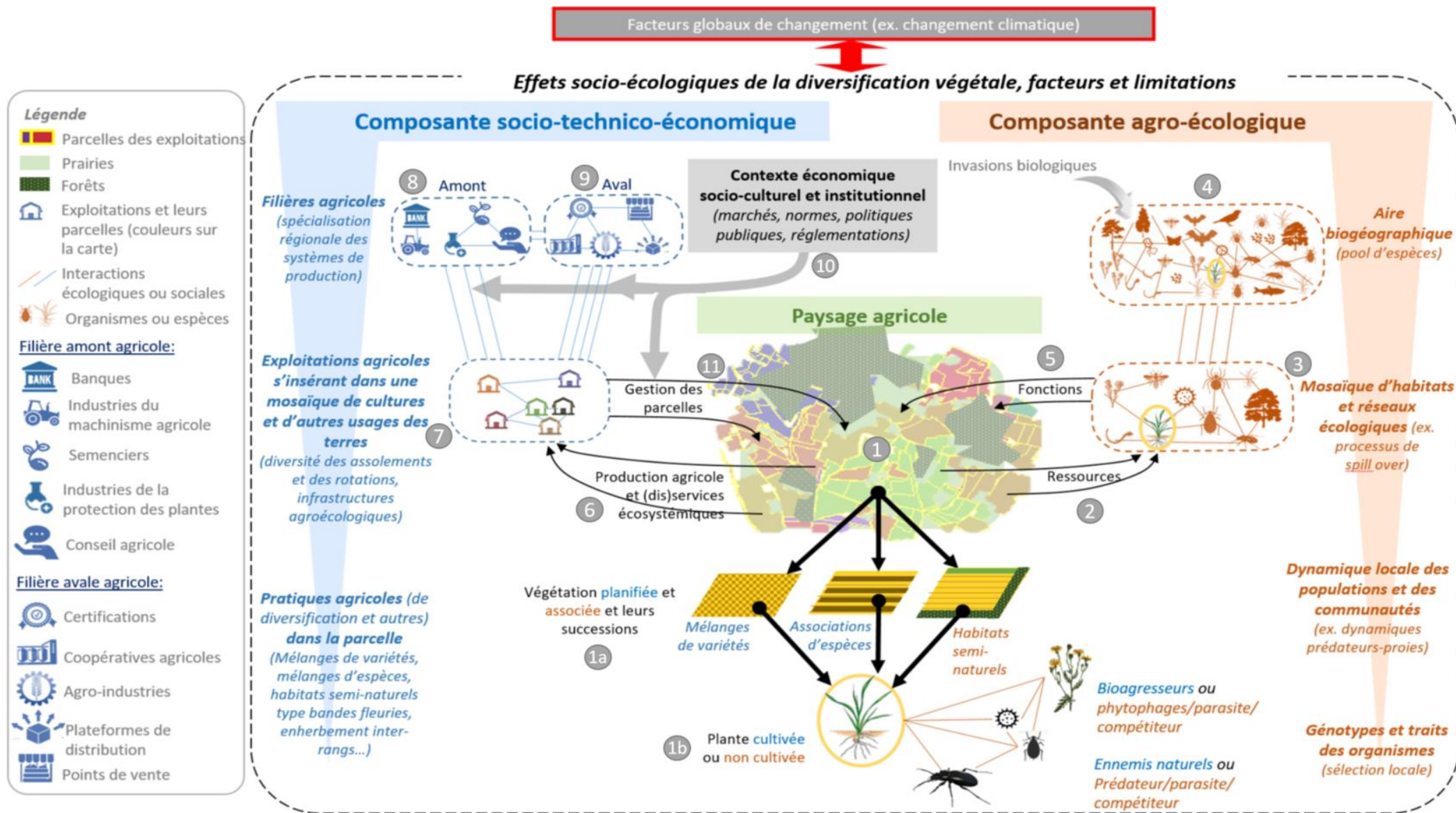


Figure 2-1. Cadre conceptuel de l'ESCO ReguNat pour analyser les effets, les facteurs et les limites socio-technico-économiques et agro-écologiques de la diversification végétale dans les paysages agricoles pour réguler les bioagresseurs des cultures. D'après Vialatte *et al.* (2022).

Les pastilles numérotées guident la lecture du schéma et illustrent les boucles de rétroaction entre les éléments de la composante agro-écologique et ceux de la composante socio-technico-économique (voir le texte pour la description de chaque élément numéroté).

2.1. Les effets de la diversification végétale sur la régulation naturelle des bioagresseurs, la biodiversité associée, la fourniture d'autres services écosystémiques et le rendement des cultures

2.1.1. Diversifier la végétation des parcelles et des paysages agricoles est un levier pour protéger les cultures

Introduction

La régulation naturelle des bioagresseurs résulte de trois types d'interactions entre les organismes vivants (Figure 2-2) : les interactions dites *bottom-up* entre la plante cultivée et son bioagresseur (phytophage, parasite ou pathogène), les interactions dites *top-down* entre les bioagresseurs et leurs ennemis naturels⁵⁸, et la compétition entre la plante cultivée et les plantes voisines (cultivées ou adventices).

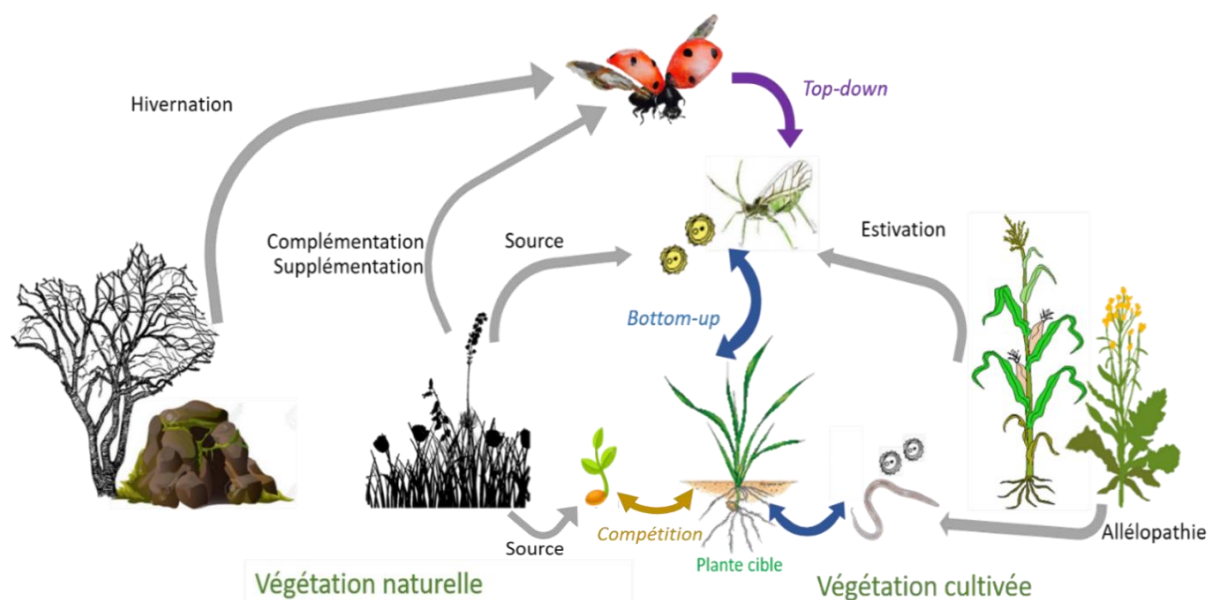


Figure 2-2. Illustration schématique des interactions écologiques entre les bioagresseurs aériens et telluriques (ici symbolisés par des pucerons, champignons pathogènes, nématodes et adventices), les plantes cultivées, la végétation semi-naturelle et les ennemis naturels (ici symbolisés par une coccinelle), impliqués dans la régulation naturelle.

Top-down : interaction biotique entre un bioagresseur et ses ennemis naturels ; *Bottom-up* : interaction biotique entre la plante cible et ses bioagresseurs. *Compétition* : interaction entre la plante cible et une autre plante (cultivée ou adventice). Les interactions dites directes sont les interactions impliquant la plante cible et ses bioagresseurs. Les autres interactions biotiques sont dites indirectes et impliquent des organismes supplémentaires à la plante cible et ses bioagresseurs. C'est le cas des processus de compétition existant également entre les bioagresseurs ainsi qu'entre les ennemis naturels, mais qui ne sont pas représentés ici. Des exemples de processus écologiques sont indiqués sur les flèches à titre illustratif. Les échelles spatiales et temporelles en jeu ne sont pas représentées (voir pour cela la Figure 2-1). *Source* : auteurs

⁵⁸ Les ennemis naturels désignent les organismes antagonistes des bioagresseurs : les prédateurs d'organismes bioagresseurs, les parasitoïdes (dont les larves se développent aux dépens d'un autre organisme) et les microorganismes parasites. Les ennemis naturels des bioagresseurs peuvent être des microorganismes (virus, bactéries, champignons, nématodes), des invertébrés (arthropodes prédateurs ou parasitoïdes) ou des vertébrés (mammifères, oiseaux). Avec les pollinisateurs, les ennemis naturels font partie des auxiliaires de culture.

En principe, la régulation des bioagresseurs par la diversification végétale repose essentiellement sur le fait qu'un même bioagresseur ne peut consommer/coloniser toutes les plantes cultivées : il existe une **spécialisation des bioagresseurs vis-à-vis des plantes cultivées** qui peut être plus ou moins marquée. En d'autres termes, la « différence » d'une plante vis-à-vis de sa voisine est un des principaux déterminant des mécanismes biologiques et écologiques pouvant favoriser la régulation des bioagresseurs. De ce fait, d'un point de vue théorique, **une augmentation de la diversité végétale induit un effet de dilution de la plante hôte du bioagresseur dans un couvert végétal ou un paysage de plantes non hôtes** (voir par exemple Halliday et Rohr, 2019) : confrontés à une ressource végétale ainsi diluée, les bioagresseurs phytophages mettent plus de temps à trouver leur plante hôte et à les coloniser. S'ajoute à cela **l'intervention des ennemis naturels des bioagresseurs**, qui dépend fortement de la fourniture de différentes ressources pour ces organismes auxiliaires (ressources florales, proies alternatives, sites d'hivernation, etc.), basée elle aussi sur la diversité végétale à différentes échelles spatiales et temporelles.

La différence entre plantes au sein d'un peuplement a été considérée dans cette synthèse du point de vue de sa gestion agronomique, c'est à dire selon le niveau de diversité intra- et interspécifique, ainsi que par des caractéristiques de déploiement temporelles et spatiales, de la parcelle au paysage. D'autres différences entre plantes peuvent toutefois intervenir dans les effets de la diversité végétale sur la régulation, comme les traits fonctionnels des plantes (par exemple le ratio surface/masse sèche des feuilles, l'architecture de la plante ou le type d'association mycorrhizienne).

Démarche adoptée pour organiser la synthèse des connaissances

Comme indiqué dans la section 1.2, la diversification des parcelles et des paysages agricoles peut résulter d'une large gamme de pratiques incluant la diversification spatiale et temporelle de la végétation cultivée dans la parcelle, l'implantation d'éléments semi-naturels au sein de l'exploitation ou encore la gestion coordonnée des assolements et des éléments semi-naturels à l'échelle d'un territoire. Pour évaluer le potentiel offert par la diversification végétale pour protéger les cultures, les différentes modalités de diversification ont été individuellement considérées :

- à l'échelle de la parcelle : diversification intra-spécifique (mélanges de variétés, variétés paysannes ou traditionnelles), interspécifique (cultures associées, agroforesterie, végétation inter-rang) et temporelle (rotations des cultures de rente, implantation de couverts durant l'interculture) ;
- à l'échelle du paysage : diversification de la végétation cultivée (assolements et configuration des parcellaires) et des éléments semi-naturels⁵⁹.

Par construction, le champ de l'ESCO englobe une large gamme de catégories de bioagresseurs (plantes, animaux, microorganismes) et de types de cultures (grandes cultures, maraîchage, cultures pérennes). La littérature scientifique mobilisée (qui n'est pas restreinte à la France – cf. Encadré 2-1) est foisonnante, comme en témoigne la taille du corpus bibliographique sur lequel repose l'analyse (près de 1 000 références dont une soixantaine d'articles de synthèse – narratives ou méta-analyses). Afin d'organiser la synthèse des connaissances et de dépasser la présentation d'une collection de cas particuliers (par exemple effets d'une association de cultures particulière sur un taxon de bioagresseur particulier), l'analyse bibliographique s'est attachée à identifier les mécanismes écologiques qui sous-tendent la régulation naturelle ainsi que les traits écologiques des bioagresseurs affectés par ces mécanismes de régulation. La synthèse de littérature apporte donc des résultats à la fois généraux sur la compréhension du fonctionnement du système, et adaptables (parce que le fonctionnement est compris) aux enjeux territoriaux de protection des cultures.

Il est essentiel de rappeler que la **quantification** des effets de la diversification végétale sur la réduction des populations de bioagresseurs des cultures est très difficile voire impossible à établir de façon générique en raison de la diversité des situations étudiées, y compris pour une modalité de diversification donnée. En effet, les articles traitent d'une grande diversité de bioagresseurs, de plantes cultivées et non cultivées, de pratiques agricoles, de zones biogéographiques, de contextes climatiques. Les systèmes de référence auxquels sont comparés les systèmes diversifiés diffèrent également d'une étude à l'autre. D'un point de vue méthodologique, la diversité des métriques employées pour évaluer la régulation naturelle des bioagresseurs rend difficile la comparaison des effets estimés. La quantification relative des effets de la diversification végétale nécessiterait un travail dédié de méta-analyse, non conduit dans le cadre de l'ESCO.

⁵⁹ De fait, les études traitent essentiellement des éléments semi-naturels situés à l'extérieur des parcelles.

Encadré 2-1. Contextes géographiques et objets d'études du corpus bibliographique collecté pour analyser les effets de la diversité végétale sur les bioagresseurs des cultures

Mélanges variétaux

La littérature porte essentiellement sur la régulation des **pathogènes aériens** et des **insectes aériens**. La majeure partie des études concerne les **systèmes de grandes cultures**. Concernant les pathogènes aériens, la littérature est dominée par les **maladies fongiques** en grandes cultures, notamment les **céréales à paille** (blé, orge, avoine, riz) et d'autres **grandes cultures** (colza) en **région tempérée**. Quelques travaux portent sur l'arboriculture (pommier) et le maraichage (laitue), ainsi que sur des systèmes tropicaux ou subtropicaux (soja, sorgho, coton, maïs, café, banane). Concernant les insectes aériens, peu de travaux s'intéressent directement à l'effet régulateur des mélanges variétaux, et l'interprétation des mécanismes en jeu s'appuie sur les régulations observées en systèmes naturels. Les études conduites en système cultivé ont été réalisées en majorité en **zone tempérée de l'hémisphère nord**.

Cultures associées

Les effets de régulation des bioagresseurs par les associations de cultures de rente sont parmi les plus documentés, comme en témoignent les nombreux travaux de synthèse disponibles. Ils concernent surtout la régulation des **adventices**, des **insectes aériens** et de **pathogènes aériens**. Ces travaux couvrent la quasi-totalité du globe, mais sont très centrés sur l'étude des associations **céréales-légumineuses** en **Europe et Afrique**, alors qu'ils couvrent une plus grande gamme de culture pour ce qui est des systèmes maraichers de plein champ et fruitiers.

Agroforesterie

Les régulations naturelles en systèmes agroforestiers sont également bien documentées, cette fois-ci majoritairement en **milieu tropical** (Amérique du Sud, Afrique, Asie du Sud-Est – environ 75 % du corpus analysé). Les milieux tempérés (Europe, Etats-Unis et Chine) représentent 20 % des études du corpus. Les milieux semi-arides (Afrique, Nord de l'Inde) sont les moins représentés avec seulement 5% des études du corpus. Les principaux bioagresseurs étudiés sont les **insectes** (environ 50 % du corpus), suivis des **pathogènes** (champignons et bactéries) et des **adventices**.

Diversification des rotations

Il est à noter que le traitement de la rotation en tant qu'objet d'étude scientifique a décliné dès les années 1970, de façon conjointe avec l'innovation en matière de rotation (*cf.* Section 1.2.3), rendant difficile la réalisation d'une analyse bibliographique actualisée à leur sujet (d'autant que les travaux académiques publiés avant les années 1990 sont moins bien référencés dans les bases de données bibliographiques telles que le Web of Science). Dans le corpus de l'ESCO, les travaux sur les rotations portent en grande majorité sur leurs effets vis-à-vis des **adventices**, et, dans une moindre mesure, des **nématodes** et des **pathogènes telluriques**. Ces travaux sont essentiellement conduits sur **grandes cultures**, en contexte **nord-américain et européen**.

Diversification de la végétation cultivée dans le paysage

Les modalités de diversification de la partie cultivée du paysage (tant en termes de composition que de configuration) sont relativement moins documentés que les autres. Ces travaux concernent essentiellement des paysages de **grandes cultures** (céréales à paille, maïs soja et colza) **européens et nord-américains**. Plus de la moitié des études porte sur la régulation des **insectes ravageurs** des cultures, et environ 20 % à celles des **adventices**. La régulation des agents pathogènes est très peu étudiée, et fait essentiellement l'objet de travaux théoriques qui proposent des hypothèses non testées empiriquement.

Diversification basée sur la végétation semi-naturelle du paysage

La végétation semi-naturelle est avant tout considérée dans la littérature sous l'angle de la conservation de la biodiversité en général. Elle est peu souvent étudiée sous celui de ses interactions avec la production agricole. Dans le corpus de l'ESCO, les travaux portent ainsi majoritairement sur les ennemis naturels des bioagresseurs associés aux éléments semi-naturels. Lorsqu'ils sont étudiés, les bioagresseurs considérés sont principalement des **insectes ravageurs** et plus rarement des pathogènes et des adventices. La majorité des articles du corpus concernent les **céréales** (blé, maïs) et les **cultures fruitières** (pommier, poirier, cerisier) en **milieu tempéré**, en Europe et à un degré moindre en Amérique du Nord. La vigne fait également l'objet de différentes études, en milieu méditerranéen, en Afrique du Sud ou aux Etats-Unis.

Des effets majoritairement positifs de la diversité végétale sur la régulation des bioagresseurs

La littérature scientifique porte essentiellement sur les liens entre le fonctionnement de l'écosystème et l'abondance des bioagresseurs. Les travaux renseignent ainsi sur la **capacité de la diversité végétale à contribuer à la diminution de la taille des populations de bioagresseurs par rapport à des situations témoins**. Ils analysent rarement le lien de causalité entre cette dernière et la caractérisation (nature, niveau) des dégâts observés sur les plantes cultivées. De ce fait, la littérature renseigne sur un potentiel de régulation permis par la diversité végétale.

Le Tableau 2-1 résume les effets des différentes modalités de diversification végétale sur les différentes catégories de bioagresseurs. **Il est à noter que les effets positifs par grande catégorie de bioagresseur ou par modalité de diversification ne préjugent en rien de leurs additivités. D'une part, les effets positifs de différentes modalités de diversification vis-à-vis de différentes catégories de bioagresseurs⁶⁰ ne préfigurent pas de leur capacité à réguler une large gamme de bioagresseurs si ces modalités sont mises en œuvre conjointement**, car ils peuvent activer des mécanismes écologiques opposés ou difficilement compatibles⁶¹. D'autre part, **les effets positifs d'une modalité de diversification donnée vis-à-vis de différentes catégories de bioagresseurs ne permettent pas de conclure que cette modalité est efficace pour réguler simultanément différentes catégories de bioagresseurs⁶²**, car les effets rapportés dans la littérature dépendent de la déclinaison de cette modalité de diversification testée vis-à-vis de chaque catégorie de bioagresseurs : une modalité de diversification donnée n'est en effet pas déclinée de la même manière (conception de l'association de cultures de rentes, choix des plantes compagnes, conception de la rotation, etc.) selon la catégorie (voire le taxon) de bioagresseurs ciblée.

La synthèse bibliographique montre que chaque catégorie de bioagresseurs peut potentiellement être régulée par au moins une modalité de diversification. Dans la majorité des cas (couple « modalité de diversification - catégorie de bioagresseur »), la littérature fait consensus sur l'effet positif de la diversité végétale. Toutefois, le niveau de consensus scientifique est variable entre modalités de diversification (avec, par exemple, un fort niveau de consensus sur l'effet des mélanges variétaux sur les maladies aériennes, et un niveau de consensus moindre sur l'effet de l'agroforesterie sur les insectes aériens en milieu tempéré). Par ailleurs, un effet positif bien démontré dans la littérature ne préjuge pas nécessairement de l'amplitude de cet effet. L'efficacité d'une modalité de diversification sur un bioagresseur dépend des mécanismes écologiques impliqués, qui sont eux-mêmes fonction des traits de vie des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels le cas échéant (*cf. infra*).

La littérature apparaît plus fournie, notamment en travaux de synthèse (notés ***), sur les modalités de diversification végétale à l'échelle de la parcelle (mélanges de variétés, associations d'espèces, rotations), et fait état d'effets majoritairement positifs de la diversité végétale sur la régulation des bioagresseurs. Notons que les travaux portent essentiellement sur la *composition* de la végétation intraparcellaire (choix des variétés et des espèces). **L'arrangement spatial (configuration) de la végétation intraparcellaire (implantation aléatoire, en bandes parallèles, densité du semis, etc.) est globalement reconnu dans la littérature comme un levier susceptible d'être actionné pour bénéficier d'effets positifs de la diversification végétale.** Cependant, les travaux dédiés à l'analyse des effets de la configuration spatiale de la végétation intraparcellaire sur les bioagresseurs sont très rares, et les mécanismes qui sous-tendent les effets observés sont partiellement confondus avec ceux qui sous-tendent les effets de la composition biologique (intra et interspécifique) de la végétation intraparcellaire (voir Encadré 2-2).

Les effets du paysage cultivé (diversité des assolements) et non cultivé (diversité des éléments semi-naturels) font quant à eux essentiellement l'objet d'attendus théoriques mais non testés expérimentalement (cases bleues). En effet, ils sont inférés d'après la comparaison d'une gamme de situations existantes : la littérature adopte une posture observationnelle des effets de gradients de paysages sur la biodiversité dans son ensemble, les

⁶⁰ Par exemple les associations de cultures vis-à-vis des insectes aériens et les rotations vis-à-vis des nématodes.

⁶¹ Ces mécanismes sont détaillés pour chaque modalité de diversification dans le Chapitre 3 du rapport scientifique de l'ESCO.

⁶² Par exemple, la lecture de la ligne « diversité temporelle intraparcellaire (rotations) » ne permet pas de conclure qu'un allongement des rotations a un effet simultanément positif sur la régulation des adventices, des insectes telluriques, des maladies aériennes et telluriques, des nématodes et des limaces. Elle permet uniquement de conclure que (i) lorsque les rotations sont conçues pour réguler les adventices, leur effet positif sur la régulation de ces bioagresseurs tend à être démontré, ou encore que (ii) lorsqu'elles sont conçues pour réguler les maladies d'origine tellurique, la littérature (abondante) démontre un effet potentiellement très fort sur la régulation de ces bioagresseurs.

auxiliaires de cultures le plus souvent, et plus rarement les bioagresseurs. Là encore, les effets de la composition du paysage (qu'il s'agisse de la part cultivée ou semi-naturelle) sont davantage étudiés que ceux de sa configuration. Cependant, quelques études remarquables analysent de façon conjointe les hétérogénéités de composition et de configuration de la mosaïque cultivée du paysage. Ces travaux suggèrent que la force des effets de configuration est au moins égale à celle des effets de composition. Ainsi, **la diversification des paysages en vue de réguler les bioagresseurs devrait impliquer non seulement une diversité des assolements, mais de façon tout aussi importante une réduction de la taille des parcelles**. Par exemple, Alignier *et al.* (2020) ont montré que si l'objectif est de favoriser la diversité des adventices dans les parcelles, jouer sur la taille des parcelles (en la réduisant) est un levier plus efficace que la diversité des assolements, et aussi efficace que la proportion d'habitats semi-naturels. Les habitats semi-naturels sont des sources d'espèces végétales variées tandis que les tailles de parcelles réduites facilitent la dispersion des plantes (y compris celles dispersant sur de courtes distances). La diversité des communautés d'adventices étant favorable à leur régulation dans les parcelles (au travers notamment de la compétition), la diversité des paysages au travers de leur composition et de leur configuration est un facteur positif de leur régulation.

Légende du Tableau 2-1 :

- **Nature de l'effet de la modalité de diversification sur la régulation du bioagresseur concerné :**

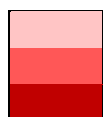


Consensus de la littérature en faveur d'un effet positif sur la régulation du bioagresseur.

Le niveau d'intensité du vert traduit le niveau de consensus de la littérature sur le sens positif de l'effet (+ le vert est foncé, + le consensus est fort)

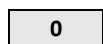


Absence de consensus de la littérature : effet ambigu



Consensus de la littérature en faveur d'un effet négatif sur la régulation du bioagresseur.

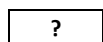
Le niveau d'intensité du rouge traduit le niveau de consensus de la littérature sur le sens négatif de l'effet (+ le rouge est foncé, + le consensus est fort)



0 Pas d'effet significatif (des travaux existent mais ne mettent en évidence aucun/très peu d'effet)

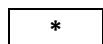


Hypothèses théoriques sur l'existence d'un effet sur la régulation du bioagresseur mais pas de preuves

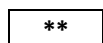


? **Information insuffisante pour conclure** (y compris sur le plan théorique)

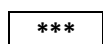
- **Niveau d'investigation de ces effets dans la littérature (recul scientifique) :**



***** littérature **rare/très peu abondante** (mais suffisamment robuste pour conclure)



****** littérature **relativement abondante** mais **pas (ou très peu) de travaux de synthèse/reviews**



******* littérature **abondante** incluant des **travaux de synthèse/reviews**

Tableau 2-1. Synthèse des effets des différentes modalités de diversification végétale sur les différentes catégories de bioagresseurs

Catégories de bioagresseurs → Modalités de diversification ↓	Adventices	Insectes aériens	Insectes telluriques	Maladies vectorielles	Pathogènes aériens	Pathogènes telluriques	Nématodes	Autres bioagresseurs		
Mélanges variétaux	* Effet attendu positif	**	?	* Effet faible	*** Amplitude très variable	* Effet faible	?	?		
Cultures associées	***	*** Effet fort	*	?	*** Effet fort	* Amplitude variable	?	?		
Agroforesterie	** Effet assez fort	*** Amplitude variable	?	?	** Effet plus faible que pour les insectes	?	*	striga : *	gastéropodes : * Effet lié à l'absence de travail du sol	
↗ diversité rotations	*** Effet fort lié au travail du sol	* Effet à l'échelle du paysage	* Effet potentiellement fort	?	* Efficace lorsque l'inoculum est local	* Effet potentiellement fort	** Effet potentiellement très fort	?		
↘ part d'une culture dans le paysage	?	* Effet attendu positif	?	* Effet attendu positif		?	?	rats taupiers : *		
↗ diversité de l'assolement	0*	* Effet attendu positif	?	* Effet attendu positif		?	?	araignées : 0*	chauves-souris : *	oiseaux : *
↘ taille des parcelles	* Effet attendu positif	* Effet attendu positif	?	* Effet attendu peu clair			* Effet attendu peu clair	?		
↗ distance d'isolement entre cultures	* Effet attendu variable	* Effet attendu positif	* Effet attendu positif	* Effet attendu positif			* Effet attendu positif	?		
↗ diversité des ESN* dans le paysage	* Effet attendu positif	** Effet faible	?	* Effet attendu positif			?	Acarions : * Effet attendu positif		

NB : La **non-additivité des effets** synthétisés dans ce tableau interdit toute lecture transversale entre lignes mais aussi entre colonnes. Cette règle est d'autant plus fondamentale que l'analyse des effets multiples de chaque modalité de diversification sur des cortèges de bioagresseurs, ainsi que des effets combinés de plusieurs modalités de diversification constitue un champ de recherche à développer.

* ESN : éléments semi-naturels

Encadré 2-2. Effets combinés de la configuration spatiale et de la composition biologique de la végétation intra-parcellaire

L'**architecture de la plante ou du couvert** est la principale caractéristique spatiale des peuplements diversifiés mise en avant pour expliquer l'effet de la diversification végétale sur la régulation des bioagresseurs. L'architecture de la plante ou du couvert garantit un effet barrière contre la dispersion des graines d'adventices, des pathogènes aériens ou telluriques (*via* l'architecture des profils racinaires) et des insectes à vol passif. Elle limite également l'accès aux ressources pour les bioagresseurs, par exemple l'accès à la lumière freinant ainsi la croissance des adventices, ou l'accès aux sites de pontes régulant la reproduction des insectes herbivores. De manière indirecte, elle modifie le microclimat et la complexité structurale de l'habitat pour les bioagresseurs comme pour leurs ennemis naturels. Outre l'architecture de la plante ou du couvert, la configuration spatiale intraparcélaire détermine la **zone d'influence de l'élément de diversification** (par exemple, la distance à la plante compagne abritant des ennemis naturels), donc l'intensité de la régulation qui en découle.

Les auteurs relèvent parfois l'ambivalence des stratégies d'arrangement spatial quant à leurs effets sur la régulation des bioagresseurs. Ainsi, la ou les espèces associées à la culture principale sont susceptibles d'engendrer des effets non souhaités tels que le salissement de la parcelle (en augmentant le stock de graines d'adventices) et une compétition avec la culture de rente propre à en réduire le rendement. **Le choix de la composition biologique des espèces associées doit alors tenir compte des effets bénéfiques de complémentarité de niche ou de facilitation entre espèces, qui seront à même de compenser les effets néfastes de la compétition pour la lumière et les nutriments.** De même, si la structure plus complexe des habitats diversifiés favorise la présence d'ennemis naturels, elle favorise également celle des insectes herbivores. Par ailleurs, les structures complexes peuvent être préjudiciables à la recherche de nourriture de certains insectes utiles, par l'augmentation du temps nécessaire pour localiser leur proie ou leur hôte. Par conséquent, si la complexité structurale favorise l'abondance des ennemis naturels, elle n'augmente pas systématiquement leur efficacité de prédation, donc la régulation biologique.

Si l'effet régulateur de la configuration spatiale de la végétation au sein de la parcelle est généralement reconnu, il est intimement lié à la composition de la végétation. Les mécanismes en jeu sont souvent identifiés dans la littérature analysée, que ce soit au niveau des plantes ou du peuplement. Toutefois, cette question apparaît comme un front de science car i) la contribution de l'arrangement spatial dans les mécanismes impliqués doit désormais être quantifiée, de façon à ii) en déduire des lois générales extrapolables à d'autres conditions que celles, très locales et spécifiques, jusqu'alors explorées. La mise en place d'expérimentations dédiées, la constitution de larges bases de données, et la modélisation, devraient permettre d'œuvrer dans ce sens.

Globalement, il apparaît que **les adventices sont principalement régulées par les associations d'espèces à l'échelle parcellaire et les rotations.** Les associations d'espèces agissent *via* leur arrangement spatial, qui favorise la compétition pour les différentes ressources, notamment la lumière. L'allélopathie, faisant intervenir une communication chimique entre les plantes, est de plus en plus invoquée comme autre mécanisme pour expliquer cette régulation (notamment en système agroforestier), mais ceci reste à démontrer. Les rotations agissent en diversifiant les pressions de sélection au cours du temps. Les effets régulateurs de la diversité végétale du paysage (composantes cultivée et/ou semi-naturelle) restent quant à eux principalement théoriques et très peu étudiés⁶³. La littérature est quasi-inexistante sur l'effet des mélanges variétaux sur la régulation des adventices (et les rares effets rapportés sont non significatifs). Les principaux traits des adventices impliqués dans les effets de la diversification végétale sont les traits démographiques (par exemple fréquence et mode de reproduction) et de forme de résistance (sous forme de graine par exemple). La compétition vis-à-vis des adventices est le mécanisme le plus fort associé aux effets de la diversification.

La présente synthèse met clairement en évidence que l'abondance (ou la densité) de la flore adventice n'est pas un indicateur suffisant pour estimer l'efficacité de sa régulation. En effet, la diversité des espèces composant cette flore détermine également sa capacité à concurrencer la culture. La littérature conclut qu'une flore adventice diversifiée et équilibrée a un impact concurrentiel limité vis-à-vis de la culture de rente. De plus, la diversité de la flore adventice est favorable à la biodiversité (dont font partie les ennemis naturels des bioagresseurs). La gestion agroécologique de la flore adventice a donc pour objectif de favoriser la diversité des

⁶³ Il n'en reste pas moins que certaines études sont néanmoins remarquables de par l'ampleur des jeux de données rassemblés. C'est notamment le cas de l'étude multi-pays d'Alignier *et al.* (2020), considérant 1451 parcelles réparties dans 432 paysages situés dans sept régions européennes (Allemagne, UK, France, Espagne) et une canadienne. Cet article traite de l'effet du paysage (configuration et composition) sur la diversité végétale intra-parcellaire en tant que support d'organismes ayant un rôle dans la régulation biologique d'une partie de cette diversité, la flore adventice.

adventices tout en maintenant leur abondance/densité sous des seuils de manière à ne pas trop affecter la production agricole. Identifier les seuils d'abondance/densité et de diversité optimaux en fonction de l'équilibre entre les risques que représentent les adventices pour les plantes cultivées et les bénéfiques en termes de soutien à la biodiversité est un enjeu scientifique majeur. En écho à de tels seuils, se pose la question de l'acceptabilité des agriculteurs vis-à-vis de la présence d'adventices dans les parcelles.

Les **insectes ravageurs** peuvent être régulés à l'échelle de la parcelle par la diversité intra mais surtout interspécifique, et à l'échelle du paysage, par la diversité des cultures. Généralement, la diversité des éléments semi-naturels favorise les ennemis naturels (tant en abondance qu'en diversité), sans toutefois que les conséquences sur la régulation des bioagresseurs ne soient démontrées. Les principaux traits des insectes qui modulent les effets de la diversification sont le degré de spécialisation vis-à-vis des plantes hôtes et la capacité de dispersion. Les mécanismes intervenant dans leur régulation sont nombreux et principalement associés à la réduction de la disponibilité spatiale et temporelle des ressources (notamment l'abondance de la culture cible) aux échelles intra-parcellaires et paysagères, ainsi qu'à la présence et l'abondance des ennemis naturels.

Les **agents pathogènes aériens** ont été très largement étudiés à l'échelle de la parcelle, et très peu à l'échelle du paysage. Quelques pathosystèmes dominent la littérature, en particulier ceux associés aux céréales à paille. A l'échelle de la parcelle, ils peuvent être régulés principalement par la diversité intra-spécifique et les rotations et, dans une moindre mesure, par la diversité interspécifique. Les effets de la diversité végétale à l'échelle du paysage sont surtout théoriques : la fragmentation des paysages et les barrières à la dispersion (comme les haies) ont un effet attendu positif. Cependant, des effets négatifs des habitats semi-naturels sur l'incidence de certaines maladies en parcelle ont été observés, du fait de la présence de plantes hôtes relais. Les principaux traits des agents pathogènes impliqués dans les effets de la diversification végétale sont la période de latence et le caractère polycyclique de la maladie (traits de résistance et démographiques), la capacité de dispersion et la spécialisation à l'hôte. Les mécanismes intervenant principalement dans leur régulation sont la dilution/concentration de l'hôte, l'effet barrière et l'effet du microclimat. Les **agents pathogènes telluriques** présentent des réponses à la diversification intra-parcellaire comparables aux agents pathogènes aériens, seule l'intensité des effets de la diversité intra-spécifique dans la parcelle présente des effets positifs plus faibles. Du fait de leurs faibles distances de dispersion, on ne s'attend pas à des effets importants de la diversité paysagère sur la régulation des agents pathogènes telluriques.

Les **autres bioagresseurs**, comme les insectes telluriques, les maladies vectorielles, les nématodes, les gastéropodes et les acariens sont très peu étudiés dans la littérature scientifique.

Il ressort également de la synthèse que ces effets de régulation des bioagresseurs par la diversité végétale reposent premièrement sur des **mécanismes d'interactions entre les plantes et les bioagresseurs** (mécanismes ascendants dits *bottom-up* suivant la logique des interactions trophiques verticales), **et la compétition entre plantes**. Ces mécanismes sont soit d'ordre structurel, comme la distance physique entre deux plantes hôtes, la dilution ou les effets barrière, soit d'ordre biotique, à l'instar des mécanismes de défenses naturelles ou la compétition pour les ressources. La régulation des bioagresseurs implique également des niveaux trophiques multiples, principalement des interactions avec leurs **ennemis naturels** (mécanismes descendants dits *top-down*), eux-mêmes très majoritairement favorisés par la diversité intra et interspécifique dans la parcelle, et, à l'échelle du paysage, la diversité des assolements, les rotations et la quantité et la diversité des habitats semi-naturels. Des effets marginalement positifs de la diversité interspécifique dans la parcelle sur les ennemis naturels existent également. Les mécanismes *bottom-up*, *top-down* et la compétition peuvent également agir de concert ou, *a contrario*, de façon opposée.

Si la littérature converge dans la grande majorité des cas en faveur d'une capacité de la diversité végétale à réguler les populations de bioagresseurs, il faut cependant souligner que le risque d'inefficacité, voire d'effet adverse d'une modalité de diversification végétale sur la régulation dans un contexte spécifique, est bien réel. Au-delà du cas unique de consensus de la littérature témoignant d'une aggravation de la pullulation des gastéropodes en systèmes agroforestier (case rouge), des cas d'étude relatant des effets négatifs existent pour l'ensemble des modalités de diversification. Pour certains couples « modalité de diversification – catégorie de bioagresseurs », la littérature rapporte autant d'effets négatifs que positif (par exemple concernant l'effet des éléments semi-naturels sur les insectes aériens), empêchant de dégager un consensus clair (cases jaunes). L'ambiguïté de ces cas s'explique la plupart du temps par la dépendance des effets aux traits de vie des organismes en jeu (comme la capacité et le mode de dispersion, la spécialisation d'hôte ou les formes de résistance). L'analyse des mécanismes écologiques sous-jacents permet également de comprendre les effets

ambigus. En effet, la littérature met parfois en évidence des effets opposés entre mécanismes – par exemple, des effets directs issus des interactions entre bioagresseurs et plantes, et des effets indirects différents faisant intervenir des ennemis naturels – témoignant de la complexité des processus en jeu. Ceci est particulièrement le cas des modalités de diversification reposant sur la composition de la végétation dans le temps et l'espace (à toutes les échelles). Les effets de la configuration de la végétation sont par contre plus univoques.

Enfin, certains travaux relatent une latence d'expression des processus écologiques induits par la diversification végétale à larges échelles spatiales (diversité des éléments semi-naturels, gestion des assolements dans les paysages), ainsi que pour certaines modalités de diversification intra-parcellaires. C'est notamment le cas dans les systèmes agroforestiers, incluant des arbres dont la croissance est lente par nature, ou dans celui des rotations, dont l'effet sur l'évolution des caractéristiques biologiques de l'écosystème s'exprime progressivement.

Un constat général positif, mais des situations spécifiques à préciser

Une apparente spécificité des résultats à chaque cas d'étude (idiosyncrasie) ressort formellement de la synthèse. La **dépendance au contexte** est ainsi un résultat majeur et valable pour toutes les modalités de diversification. Toutefois, les déterminants de ce phénomène sont clairement identifiés dans la littérature :

- La **caractérisation des traits de vie des bioagresseurs** (et de leurs **ennemis naturels** le cas échéant) est souvent déterminante pour identifier la ou les modalités de diversification à privilégier. En effet, la régulation d'un bioagresseur résulte de la rencontre/interaction entre les mécanismes écologiques induits par la diversité végétale (par exemple l'hétérogénéité spatiale d'un couvert constitué d'un mélange d'espèces) et les traits du bioagresseur (par exemple sa capacité de dispersion).
- Les **pratiques agricoles** mises en œuvre dans les parcelles (et par répercussion à l'échelle du paysage), sont les déterminants principaux de la variation des effets observés entre situations de production (par exemple le travail du sol). Relevant de décisions humaines, elles constituent un levier pour favoriser l'expression des régulations naturelles. Les contraintes agronomiques qui les sous-tendent et le besoin de combinaison de pratiques cohérente au sein d'un système de production restreignent toutefois le champ des possibles.
- Les **conditions climatiques** locales et saisonnières sont systématiquement évoquées dans les études pluriannuelles comme un facteur explicatif de la variabilité des effets observés. Les événements climatiques ponctuels (comme des saisons particulièrement froides, chaudes, humides ou sèches) peuvent perturber l'expression attendue des mécanismes de régulation, en entraînant par exemple une mortalité accrue des ennemis naturels.

En contrepoint, notre synthèse montre que **lorsqu'une modalité de diversification est conçue et optimisée dans un objectif de régulation d'un bioagresseur donné (objectif affiché dans les articles), son effet sur la régulation est fréquemment positif**. Quand c'est un autre objectif agronomique (par exemple gestion de la fertilité du sol, performance économique) voire environnemental (qualité de l'eau) qui est visé et que la régulation est simplement une donnée supplémentaire récoltée dans l'étude, les effets en termes de régulation apparaissent moins probants et ces études constituent une grande partie des cas témoignant des effets négatifs de la diversification sur la régulation. Le type d'objectif visé par la mise en œuvre de la diversification végétale est donc un déterminant majeur de son effet sur la régulation des bioagresseurs.

Ainsi, **il n'y a pas de prescription générique possible des modalités de diversification pour assurer la régulation des bioagresseurs**. Ce constat les place en opposition avec les stratégies de lutte chimique qui se caractérisent par la possibilité d'être déployées de façon générique quel que soit le contexte pédoclimatique. Une expertise est requise pour adapter aux contextes de production locaux la ou les modalités de diversification à déployer en priorité pour réguler les bioagresseurs cibles, voire favoriser la biodiversité locale et fournir tels services écosystémiques attendus dans le territoire (*cf infra*).

Des conditions d'expérimentation susceptibles de sous-estimer les effets régulateurs de la diversité végétale

Le potentiel de la diversification végétale pour soutenir la régulation naturelle des bioagresseurs est majoritairement évalué dans des systèmes agricoles conduits de façon conventionnelle, c'est-à-dire reposant notamment sur l'utilisation de pesticides et d'engrais de synthèse, et des variétés adaptées à ce mode de conduite. De ce fait, la littérature tend à théoriser que l'amplitude des effets de régulation observés dans le contexte actuel

pourrait alors être sous-estimée. Dès lors, un déploiement spatial et temporel large de stratégies de protection des cultures basées sur la diversification végétale pourrait aboutir à des effets amplifiés sur la régulation naturelle.

Par ailleurs, la mise en œuvre de pratiques de diversification peut répondre à des objectifs divers (cf. Section 1.2). Or la protection des cultures n'est pas nécessairement l'objectif ciblé par la diversification végétale dans les systèmes étudiés dans la littérature. Autrement dit, les modalités de diversification végétale étudiées n'ont pas nécessairement été initialement conçues pour réguler les bioagresseurs. Cela contribue à expliquer la variabilité des effets de régulation mis en évidence dans les travaux. Les **rotations constituent un cas emblématique en la matière**. Le choix des cultures se succédant dans la rotation n'est pas le même selon l'objectif recherché par l'agriculteur. Il en résulte que dans la littérature, l'effet des rotations sur les bioagresseurs constitue tantôt un effet attendu de la rotation (lorsque la protection des cultures est l'objectif qui a justifié la conception de la rotation étudiée), tantôt un effet « non intentionnel » de la rotation étudiée (conçue à une autre fin). La façon de considérer la régulation naturelle n'est que rarement explicitée dans la littérature sur les rotations, brouillant l'interprétation des résultats en termes de potentiel offert par la diversification des rotations en matière de régulation des bioagresseurs. Ainsi, pour de telles modalités de diversification, un biais de la littérature existe : on peut faire l'hypothèse que l'effet de régulation rapporté dans la présente synthèse est susceptible de sous-estimer le potentiel de régulation des bioagresseurs⁶⁴.

Il est à noter, en contrepoint de ces possibles sous-estimations des effets positifs de la diversité végétale, qu'un certain **biais scientifique relatif à la publication privilégiée des effets à la fois positifs et les plus probables à obtenir** (et pouvant ainsi favoriser la proportion des résultats positifs) est observé au moins pour deux modalités de diversification : les mélanges de variétés (littérature largement dominée par l'étude des agents pathogènes des céréales à paille en milieu tempéré) et dans une moindre mesure les associations de cultures (dominées par les travaux sur les associations céréales à paille-légumineuses).

Des lacunes de connaissances

Enfin, la synthèse identifie des lacunes dans l'acquisition des connaissances. En premier lieu, **la littérature considère de façon inégale les différentes cultures et bioagresseurs cibles** : les céréales à paille et le groupe taxonomique des pucerons sont par exemple particulièrement étudiés, alors que les cultures maraîchères, les insectes telluriques, les maladies vectorielles, nématodes, gastéropodes, acariens et plantes parasites sont étudiés de façon anecdotique. Concernant les modalités de diversification, les connaissances s'avèrent particulièrement lacunaires pour les éléments semi-naturels et la diversité des assolements dans les paysages. L'analyse de leurs effets agrège souvent une diversité de composition et de configuration de ces habitats (Bartual *et al.*, 2019). Les travaux les concernant portent davantage sur l'abondance des ennemis naturels que sur la régulation des bioagresseurs qui pourraient en découler.

De plus, seule une petite part des déclinaisons possibles de la diversification végétale est considérée dans les études scientifiques. Par exemple, la proportion des rotations étudiées par rapport au nombre total de rotations théoriquement possibles, à partir du nombre de types de cultures actuellement pratiquées, est très réduite (voir par exemple Bohan *et al.*, 2021). Du fait de l'abondante littérature nord-américaine sur ce sujet, la plupart des résultats concernent une diversification relativement modérée des rotations (rotations à 2 ou 3 cultures comparées à des situations de monoculture, modèle plus largement répandu aux USA qu'en Europe). Nous connaissons finalement encore assez peu le véritable potentiel des rotations diversifiées comme mode de gestion des bioagresseurs, si ce n'est que leur adoption a révolutionné la protection des cultures (ainsi que la gestion de la fertilité des sols, et, en conséquence, les rendements). Par ailleurs, les connaissances sont produites dans le contexte d'une sélection variétale focalisée sur les cultures les plus rentables et l'objectif de production en culture pure et à fort niveau d'intrants. Dans ce contexte, les variétés utilisées dans les études des systèmes diversifiés, ne sont pas nécessairement les plus adaptées à de tels systèmes (cf. Section 2.2.2).

⁶⁴ La littérature avance deux hypothèses quant à l'impact du contexte d'évaluation sur l'intensité des effets de régulation observés. D'une part, les perturbations exercées par l'utilisation généralisée des pesticides sur les organismes présents dans les espaces agricoles amoindrirait le potentiel de régulation. De l'autre, l'usage de pesticides dans les paysages limiterait la pression des bioagresseurs y compris pour les parcelles non traitées (effet dit « parapluie chimique »), induisant une surestimation des effets régulateurs des modalités de diversification expérimentées à une échelle locale. Un certain nombre d'informations scientifiques tendent cependant à pencher en faveur de la première hypothèse.

Enfin, du fait de la diversité des traits des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels, il apparaît illusoire (voire impossible) que le déploiement d'une unique modalité de diversification végétale soit efficace pour réguler l'ensemble des bioagresseurs (aussi appelé cortège) associés à un système de culture donné. Pourtant, à l'exception des rares études qui examinent les interactions entre composition et configuration du paysage (cf. supra), **le potentiel de régulation permis par la combinaison de modalités de diversification végétale est un angle mort de la littérature. De même, aucune étude empirique du corpus n'évalue le potentiel de régulation d'une modalité de diversification donnée vis-à-vis de plusieurs bioagresseurs.**

2.1.2. La diversification végétale est favorable à la biodiversité associée et aux services écosystémiques rendus aux agriculteurs et à la société

L'étude « EFESE-écosystèmes agricoles » conduite par l'Inra (Tibi et Therond, 2017) a clairement mis en évidence le rôle central des couverts végétaux gérés et de la structure du paysage environnant dans la fourniture d'une large gamme de services écosystémiques (Figure 2-3).

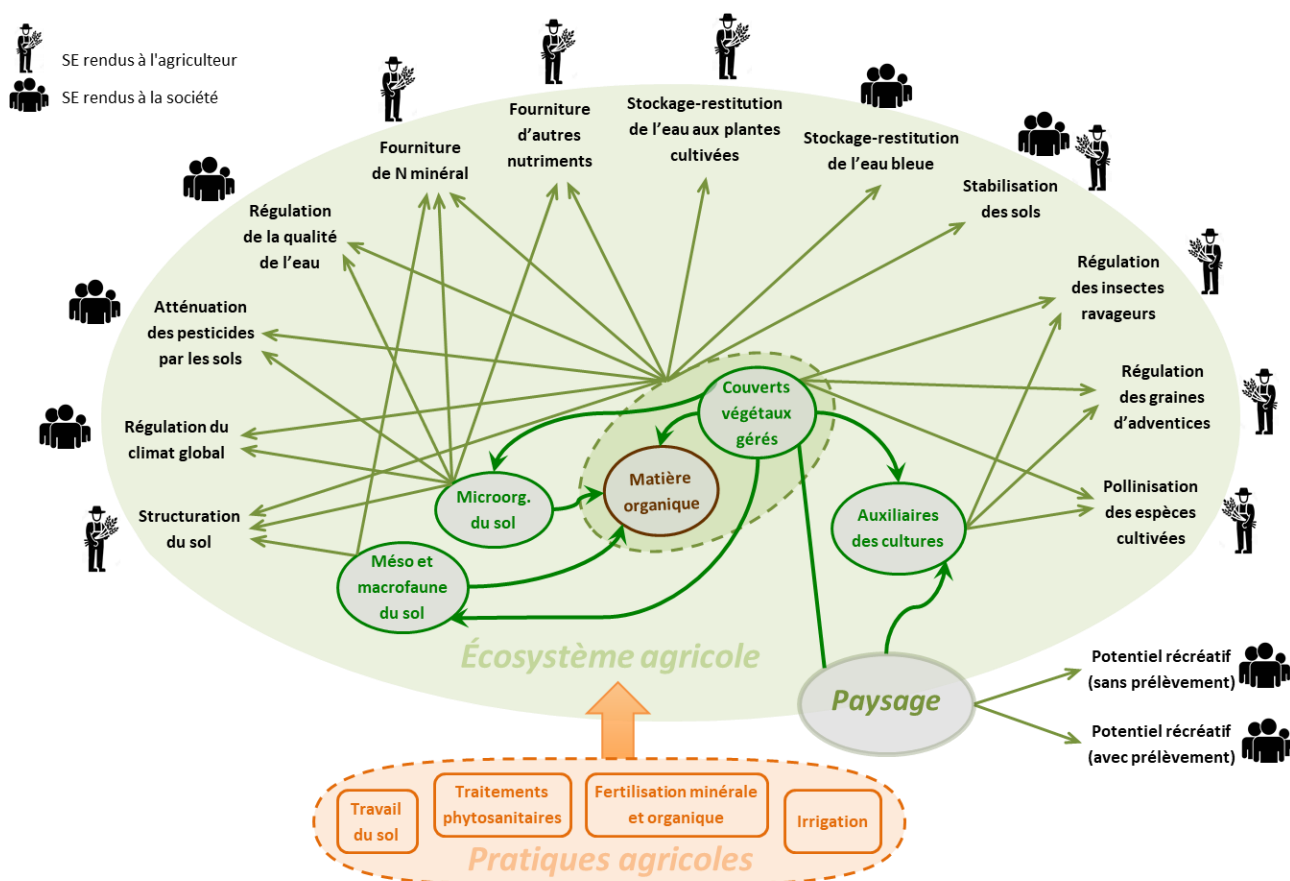


Figure 2-3. Représentation graphique simplifiée des principales composantes de la biodiversité qui sous-tendent la fourniture de différents services écosystémiques par les écosystèmes agricoles.

Source : étude EFESE-écosystèmes agricoles (Inra, 2017).

Les composantes-clefs de la biodiversité des espaces agricoles qui sous-tendent les services sont indiquées en vert : composition et configuration de la végétation de la parcelle (plantes cultivées et flore adventice), matière organique, microorganismes, méso et macrofaune du sol, auxiliaires de cultures (ennemis naturels des bioagresseurs et pollinisateurs), composition et configuration du paysage. Les principaux types de pratiques agricoles ayant un effet sur ces composantes sont représentés en orange.

Seuls les services analysés dans l'étude EFESE-écosystèmes agricoles sont représentés, d'où l'absence de certains autres services tels que la régulation des maladies des cultures.

Certains services écosystémiques bénéficient directement à l'agriculteur car ils jouent le rôle de facteurs de production (substitués, dans le cadre des systèmes de cultures dits « conventionnels », par l'usage d'intrants) : outre la régulation des bioagresseurs, c'est le cas par exemple de la fourniture de nutriments par le sol aux plantes cultivées, du stockage-restitution de l'eau aux plantes cultivées ou encore de la pollinisation des plantes cultivées. D'autres bénéficient plus largement à la société dans son ensemble, tels que le stockage de carbone, l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre ou encore les services culturels et récréatifs. Ces différents effets de la diversité végétale sur le fonctionnement des écosystèmes agricoles contribuent, en interaction avec les pratiques de gestion de ces écosystèmes (fertilisation, irrigation, travail du sol, *etc.*), à forger le rendement (quantité, qualité) et sa stabilité.

Durant la dernière décennie, le nombre d'études primaires comparant les niveaux de fourniture d'un service écosystémique donné dans différents contextes agropédoclimatiques a crû de façon exponentielle. Ces estimations individuelles ont fait l'objet d'analyses statistiques publiées sous formes de méta-analyses. Les travaux de Tamburini *et al.* (2020) et de Beillouin *et al.* (2021), qualifiés de méta-synthèses, sont des méta-analyses de méta-analyses (méta-analyses de second ordre). Ils fournissent donc une vision d'ensemble des principales tendances issues d'une très grande quantité de littérature : Tamburini *et al.* (2020) ont compilé les résultats de 98 méta-analyses, et Beillouin *et al.* (2021) ceux de 95 méta-analyses. Au total, chacune de ces deux méta-synthèses couvre à elle seule plus de 5 000 études primaires. Ces deux synthèses abordent les liens entre différentes modalités de diversification végétale et (i) la biodiversité associée, (ii), une gamme de services écosystémiques et (iii) le rendement des cultures (qui par construction résulte des interactions entre le fonctionnement de l'écosystème – donc les services écosystémiques – et les pratiques agricoles de gestion – voir Section 2.1.3).

Les méta-analyses calculent des tailles d'effet à partir des données observées empiriquement fournies par les travaux primaires. Une taille d'effet mesure la force du *lien entre deux variables*, ici par exemple un indicateur de diversité végétale et un indicateur d'un service écosystémique donné. Elle informe sur une *corrélation* et non un possible lien de causalité entre les variables considérées.

Les modalités de diversification végétale explorées dans les méta-synthèses

Les deux méta-synthèses s'intéressent aux effets d'un certain nombre de modalités de diversification végétales dont la correspondance avec celles étudiées dans l'ESCo est présentée dans le Tableau 2-2.

Compte tenu des besoins de l'ESCo, la méta-synthèse de Beillouin *et al.* (2021) a été utilisée pour analyser les liens entre diversité végétale cultivée, biodiversité associée et services écosystémiques car elle tient compte distinctement des **mélanges de variétés**, de l'**agroforesterie** (dans une acception très large incluant l'implantation de haies), des **couverts d'interculture** (« *cover crop* »), des **cultures associées ou en relai** (« *intercropping* ») et des **rotations**.

La méta-synthèse de Tamburini *et al.* (2020) complète l'analyse des liens entre diversité végétale, biodiversité et fourniture de services écosystémiques concernant la **diversification de la composante non cultivée** des espaces agricoles. Il faut cependant noter que l'analyse statistique réalisée par les auteurs sur le volet « diversification non cultivée » ne repose que sur deux méta-analyses, alors que le corpus qu'ils considèrent dans leur revue systématique en contient six (rapportant 15 tailles d'effet). Le choix a donc été fait dans l'ESCo de rapporter les résultats qualitatifs issus de la revue systématique (nombre de tailles d'effets positives/négatives) plutôt que les seuls résultats quantitatifs, trop restrictifs.

Notons que la bibliographie des méta-synthèses analysées dans ce chapitre est caractérisée par une forte asymétrie dans le nombre d'études disponibles sur les différentes modalités de diversification végétale. Alors que les mélanges interspécifiques au sein des parcelles sont explorés dans plusieurs de leurs dimensions (cultures associées ou en relai, couverts d'interculture, agroforesterie), avec un niveau de détail particulièrement élevé au sujet de l'agroforesterie, la diversité inter-parcellaire de la végétation cultivée n'est, quant à elle, pas représentée dans le corpus analysé ici. De façon intermédiaire, les mélanges variétaux et la diversification de la végétation non cultivée sont relativement peu étudiés sur le plan de leurs liens avec la biodiversité et les services écosystémiques.

Tableau 2-2. Modalités de diversification végétale considérées dans les méta-synthèses de Tamburini *et al.* (2020) et Beillouin *et al.* (2021), et retenues dans l'ESCO

Modalités de diversification	Définition	Sous-catégories (le cas échéant)	Correspondance avec la typologie adoptée dans l'ESCO
Agroforesterie (Beillouin <i>et al.</i> , 2021)	Présence de végétation ligneuse sur la parcelle. L'agroforesterie remplit trois conditions : i) au moins deux cultures interagissent biologiquement, ii) au moins une des espèces végétales est une plante pérenne ligneuse, et iii) au moins une des espèces végétales est gérée pour la production de fourrage, de cultures annuelles ou pérennes.	<ul style="list-style-type: none"> - Culture en allée (<i>alley cropping</i>) : implantation d'espèces ligneuses (principalement des arbustes) à croissance rapide (généralement légumineuses), dans les champs cultivés. Les résidus de taille des espèces ligneuses sont utilisés comme paillis dans les allées. La densité des arbustes est généralement élevée. Systèmes généralement rencontrés dans les régions tropicales. - Systèmes sylvo-arables : Espèces ligneuses plantées en rangées parallèles et en cultures intercalaires avec une culture annuelle ; généralement utilisées pour le bois d'œuvre (par exemple, <i>Juglans</i> spp), mais aussi pour le combustible (par exemple, <i>Populus</i> spp). La densité des arbres par hectare est généralement faible. Se trouve généralement dans les régions tempérées, mais pas exclusivement. - Systèmes de cultures pérennes sous ombrage : Culture d'espèces tolérantes à l'ombre (comme le cacao et le café) sous ou entre des arbres d'ombrage, ces derniers pouvant être utilisés pour le bois d'œuvre ou d'autres produits arboricoles commerciaux. - Systèmes multistrates : Combinaisons à plusieurs étages d'un grand nombre d'arbres variés à haute densité, et de cultures pérennes et annuelles. Ils comprennent les jardins domestiques et les agro-forêts. - Système séquentiel : système agroforestier séquentiel. - Haies : plantations linéaires autour des champs, incluant des brise-vents et des clôtures vivantes. - Prairies-parcs : Cultures intercalaires de cultures agricoles ou de pâturages sous des arbres matures dispersés à faible densité. Typique des milieux semi-arides comme le Sahel. - Systèmes sylvopastoraux : <i>Espèces ligneuses plantées sur des prairies permanentes, souvent pâturées.</i> 	La plupart des sous-catégories relèvent, dans l'ESCO, de la Diversité interspécifique de la végétation intraparcellaire, à l'exception (i) des jachères améliorées (Diversité temporelle de la végétation intraparcellaire), des haies (Diversité de la végétation semi-naturelle) et des systèmes sylvopastoraux (<i>Hors ESCo - résultats non détaillés dans ce chapitre</i>)
Couvert d'interculture (Beillouin <i>et al.</i> , 2021)	Plantes cultivées à des fins agronomiques ou environnementales (par exemple, pour gérer l'érosion des sols, la fertilité des sols, les bioagresseurs, la biodiversité, le lessivage des nitrates, etc.) en plus de la culture principale sur la parcelle. La plante associée peut être récoltée ou non, permanente ou non. Cette catégorie inclut (sans toutefois les distinguer dans les analyses statistiques) les plantes semées pour couvrir le sol plutôt que pour être récoltées ainsi que les bandes enherbées.		Diversité interspécifique ou temporelle de la végétation intraparcellaire selon la date de mise en place de ces couverts
Mélange de variétés (Beillouin <i>et al.</i> , 2021)	Culture simultanée de plusieurs cultivars de la même espèce sur la parcelle. Tous les cultivars sont récoltés.		Diversité intra-spécifique de la végétation intraparcellaire
Cultures associées ou en relai et plantes compagnes (Beillouin <i>et al.</i> , 2021)	Culture de plusieurs espèces pendant tout ou partie de leur cycle de croissance sur la parcelle. Cette catégorie inclut (sans toutefois les distinguer dans les analyses statistiques) : les cultures intercalaires en bandes ou en mélange, simultanées ou en relai (la plantation de la deuxième culture a lieu après que la première a fleuri ou terminé son développement, voire juste avant la récolte) ; l'enherbement inter-rang au sein des plantations pérennes (vignoble, vergers) ; les plantes "push" et "pull" semées au sein ou en bordure de champ pour affecter le comportement des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels.		Diversité interspécifique de la végétation intraparcellaire
Rotation (Beillouin <i>et al.</i> , 2021)	Succession récurrente d'un ensemble de cultures sélectionnées sur une même parcelle, chaque saison ou chaque année, selon un plan défini.		Diversité temporelle de la végétation intraparcellaire
Végétation non cultivée (Tamburini <i>et al.</i> , 2020)	Introduction d'habitats non cultivés au sein ou en périphérie du champ ou du paysage environnant. Cette catégorie inclut (sans toutefois les distinguer dans les analyses statistiques) : un niveau de complexité élevée du paysage (e.g. proportion élevée d'éléments non cultivés dans le paysage) ; des bordures de champs diversifiées (e.g. bandes enherbées / bandes fleuries) ; une taille réduite des parcelles induisant une plus grande longueur des bordures (végétation spontanée) ; une gestion extensive de la végétation spontanée en inter-rang ; la présence d'arbres dans les pâturages (ainsi que la présence de cultures pérennes à vocation énergétique, retirées de la présente analyse car non considérées comme une modalité de diversification dans l'ESCO).		Relève essentiellement de la Diversité de la végétation semi-naturelle

Les services écosystémiques considérés dans les méta-synthèses

Les deux méta-synthèses analysent le lien entre les modalités de diversification végétale et la biodiversité associée aux agrosystèmes (diversité des organismes non cultivés). Les principales variables considérées dans les méta-analyses primaires sont l'abondance, la richesse taxonomique, la biomasse et la diversité des organismes. A noter que les deux méta-synthèses considèrent la biodiversité dans son ensemble, sans possibilité de tirer des conclusions plus précises par type d'organismes (par exemple macrofaune, pollinisateurs, mésofaune du sol, etc.), ni de dissocier les effets sur les organismes inféodés aux cultures de ceux sur les organismes non inféodés aux cultures.

Les services écosystémiques ne sont pas appréhendés dans les deux méta-synthèses de façon aussi détaillée et précise que dans l'étude EFSE-écosystème agricole, du fait notamment de la diversité des cadres conceptuels et des indicateurs de services utilisés dans les méta-analyses primaires (ces cadres conceptuels et variables indicatrices n'étant d'ailleurs pas toujours explicites). Les deux méta-synthèses regroupent en effet les variables utilisées dans les méta-analyses dans les catégories suivantes :

- la **régulation des bioagresseurs**, essentiellement évaluée *via* l'abondance et/ou la diversité des insectes ravageurs, des adventices dans une moindre mesure, et des ennemis naturels chez Tamburini *et al.* (2020), et l'ensemble des bioagresseurs (dont les maladies et les adventices) chez Beillouin *et al.* (2021) ;
- la **pollinisation**, traitée uniquement par Tamburini *et al.* (2020) au travers d'indicateurs d'abondance, de diversité et d'activité des pollinisateurs ;
- la **qualité des sols**, vue sous l'angle de la fertilité dans Tamburini *et al.* (2020), et par Beillouin *et al.* (2021) à l'aide d'un ensemble de variables traduisant la fertilité, la teneur en carbone des sols et la lixiviation ;
- la **régulation de l'eau**, qui confond chez Tamburini *et al.* (2020) les aspects quantitatifs et qualitatifs (vis-à-vis de la pollution par les pesticides et les nutriments), tandis que Beillouin *et al.* (2021) séparent ces deux aspects.
- la **contribution à l'atténuation du changement climatique**, appréhendée dans les méta-synthèses sous l'angle des émissions de gaz à effet de serre et, chez Tamburini *et al.* (2020) uniquement, de la séquestration du carbone (essentiellement dans le sol) ;

Ces catégories de variables indicatrices de services écosystémiques ne sont pas exclusives. Elles définissent davantage un prisme d'analyse qu'une véritable classification de services écosystémiques précisément définis. Ainsi, les deux méta-synthèses ne mettront pas exactement les mêmes variables derrière une même catégorie de services, et au sein d'une méta-synthèse, une même variable peut participer à renseigner différentes catégories. Par exemple, chez Tamburini *et al.* (2020), la concentration du sol en carbone organique renseigne à la fois la fertilité des sols et la séquestration du carbone. Les deux méta-synthèses apportent ainsi une vision globale des liens entre une augmentation du niveau de diversité végétale et le fonctionnement de l'écosystème.

Le Tableau 2-3 rapporte les liens établis par les deux méta-synthèses entre les modalités de diversification végétales qu'elles considèrent et la biodiversité et divers services écosystémiques (dont la régulation naturelle des bioagresseurs). **Ce tableau de synthèse ne renseigne pas sur les synergies/antagonismes entre services ni même sur la fourniture de bouquets de services par une modalité de diversification donnée.** Il s'agit d'une juxtaposition de corrélations individuelles, estimées dans des situations de recherche différentes et des contextes agricoles et/ou pédoclimatiques contrastés. En ce sens, la juxtaposition de ces corrélations ne préjuge en rien de leur simultanéité. Ce tableau ne doit donc être lu que "colonne par colonne", et ne permet pas d'analyser les synergies ou les antagonismes entre bouquets de services associés à chacune des modalités de diversification végétale.

Tableau 2-3. Synthèse des liens de corrélation estimés entre les types de diversification et la biodiversité associée, divers services écosystémiques (dont la régulation naturelle des bioagresseurs)

Les informations rapportées sont de deux natures en fonction de leur origine : (i) concernant les modalités de **diversification de la végétation cultivée**, les valeurs sont issues de Beillouin *et al.* (2021) et correspondent à la variation moyenne des tailles d'effet rapportées dans les méta-analyses primaires par rapport à la situation de référence (en %). Le cas échéant, les intervalles de confiance sont précisés entre []. Les études portant sur des sous-catégories de l'agroforesterie étant peu nombreuses, seul l'effet est rapporté (%), sans intervalle de confiance. (ii) Concernant les modalités de **diversification de la végétation non cultivée**, les informations proviennent de Tamburini *et al.* (2020) et correspondent au nombre de tailles d'effet rapportant une variation positive (nES+), négative (nES-) ou neutre (nESn). Les cases vertes représentent des corrélations positives, les cases en orange des corrélations négatives et les cases grises les corrélations non significatives (du fait d'un nombre de tailles d'effet trop faible et/ou d'un intervalle de confiance encadrant 0). Les NA indiquent qu'aucune information n'a pu être trouvée dans la littérature scientifique mobilisée.

L'ensemble des informations rapportées ici provient de méta-analyses considérant, indépendamment les unes des autres, les liens entre diverses modalités de diversification et la biodiversité associée ou certains services écosystémiques. Le tableau ne permet donc pas d'analyser les synergies ou les antagonismes entre bouquets de services associés à chacune des modalités de diversification végétale.

Référence	Modalité de diversification	Contextes géographiques majoritaires	Biodiversité associée	Régulation naturelle des bioagresseurs	Pollinisation	Qualité du sol	Qualité de l'eau	Régulation de l'eau	Emission de gaz à effet de serre	Stockage de carbone
Beillouin <i>et al.</i> , 2021	Mélange de variétés	USA, Chine, Europe	+2% [-12 ; +19]; NS	NA	NA	-5% [-25 ; +19]; NS	NA	NA	NA	-5% [-24 ; +4] ; NS
Beillouin <i>et al.</i> , 2021	Agroforesterie - Tous types	Asie du Sud, certains pays d'Afrique	+61% [+26 ; +105]	+59% [+38 ; +82]	NA	+19% [+16 ; +23]	+87% [+37 ; +156]	+45% [+13 ; +87]	NA	+19% [+14 ; +24]
	Cultures en allées		+45%	NA	NA	+17%	NA	NA	NA	NA
	Systèmes sylvo-arables		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Cultures pérennes sous ombrage		+86%	+40%	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Systèmes multi-strates		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Systèmes séquentiels		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Haies		NA	+84%	NA	+13%	NA	NA	NA	NA
Prairies-parks		+62%	NA	NA	+21%	NA	NA	NA	NA	
Beillouin <i>et al.</i> , 2021	Couverts d'interculture	USA, Chine, Espagne	+21% [+17 ; +25]	+125% [+83 ; +178]	NA	NA	+61% [+12 ; +132]	+10% [-10 ; +34]; NS	+29% [+1 ; +49]	+13% [+10 ; +15]
Beillouin <i>et al.</i> , 2021	Culture associées/relais et plantes compagnes	Chine, USA, certains pays d'Afrique	+7% [+3 ; +12]	+66% [+40 ; +98]	NA	+11% [+5 ; +18]	+89% [+19 ; +198]	NA	NA	+13% [+6 ; +10]
Beillouin <i>et al.</i> , 2021	Rotation	Am. du Nord, Inde, Chine, Australie	+37% [+16 ; +62]	NA	NA	+5% [+2 ; +8]	NA	+18% [-5 ; +48]; NS	+2% [-12 ; +18]; NS	+3% [0 ; +4]
Tamburini <i>et al.</i> , 2020	Végétation non-cultivée	Monde entier	nES+ = 4	nES+ = 2 nESn = 1	nES+ = 5	nES+ = 1	NA	nESn = 1	NA	NA

Liens entre diversité végétale et biodiversité associée

De manière générale, les différentes modalités de diversification végétale explorées ont un lien majoritairement positif avec la biodiversité associée aux agrosystèmes.

A l'échelle de la parcelle, les analyses quantitatives font apparaître une distinction nette entre la diversité intra-spécifique et la diversité interspécifique de la végétation cultivée. **Si les mélanges variétaux ne semblent pas significativement corrélés avec la biodiversité associée, toutes les formes d'associations d'espèces sont associées à un niveau de biodiversité significativement plus élevé qu'en système moins diversifié. L'agroforesterie (toutes pratiques confondues),** est associée aux plus fortes augmentations de la biodiversité associée (+61 % en moyenne). L'inclusion de **couverts d'interculture** est associée à une augmentation de 21% en moyenne de la biodiversité associée. Les **cultures associées ou en relai** sont positivement associées à davantage de biodiversité, mais de façon plutôt faible puisque les analyses quantitatives rapportent une augmentation moyenne de 7 % de la biodiversité. Les **rotations** sont également associées à une augmentation de 37% de la biodiversité associée.

Enfin, les modalités de diversification basées sur la **végétation non-cultivée** sont positivement associées à une augmentation de la biodiversité.

Liens entre diversité végétale et fourniture de services écosystémiques

De façon générale, les méta-synthèses mettent en évidence une **vision très fragmentaire des liens entre diversification végétale et fourniture de services écosystémiques dans la littérature scientifique**. Certains services sont très peu investigués (pollinisation, atténuation des émissions de gaz à effet de serre, et certaines modalités de diversification végétale semblent peu ou pas examinées sous l'angle de leur lien avec la fourniture de services, notamment les mélanges variétaux, certains systèmes agroforestiers (systèmes multi-strates typiques des jardins créoles, agroforesterie en région tempérée, agroforesterie séquentielle) ainsi que l'implantation de haies. **Lorsqu'ils sont étudiés, ces liens s'avèrent majoritairement positifs, bien que présentant une intensité variable selon les modalités de diversification végétale considérées.**

Régulations biologiques : régulation des bioagresseurs et pollinisation

Les méta-synthèses confirment le **lien positif fort entre diversité végétale interspécifique et régulation naturelle des bioagresseurs**, en particulier lorsque sont utilisées des couverts d'interculture (+125 % de contrôle des bioagresseurs en moyenne). Les cultures associées ou en relai et plantes compagnes sont associées à une augmentation de l'ordre de +60 % du contrôle des bioagresseurs en moyenne, et les systèmes agroforestiers sous ombrage à une augmentation de +40 %. **La présence de végétation semi-naturelle est elle aussi associée à un niveau de régulation des bioagresseurs plus élevé**, plus précisément estimé pour les haies à +84 % en moyenne.

La pollinisation fait partie des services écosystémiques les moins étudiés en lien avec la diversité végétale. Le corpus analysé ne permet pas de quantifier le lien entre ces deux variables, mais les travaux de synthèse convergent vers une **association positive entre niveau de diversité végétale et pollinisation pour l'agroforesterie**, le recours à des **cultures associées ou en relai ou des plantes compagnes** et la présence de **végétation non cultivée**. Les autres modalités de diversification ne sont pas documentées dans les travaux de synthèse considérés.

Les processus liés aux caractéristiques du sol et à la régulation qualitative et quantitative de l'eau

Comme indiqué précédemment, la « qualité du sol » n'est pas à proprement parler un service écosystémique, mais traduit plutôt un ensemble de variables décrivant les caractéristiques physico-chimiques du sol, elles-mêmes entrant en jeu dans la fourniture de tous les services rendus par les sols (voir Tibi et Therond, 2017) : structuration et stabilisation des sols (prévenant leur érosion), fourniture de nutriments aux plantes cultivées (se substituant à l'usage d'engrais), stockage et restitution d'eau aux plantes cultivées et d'eau bleue (pouvant être utilisée à d'autres fins), régulation de la qualité de l'eau et régulation du climat par atténuation des gaz à effet de serre et stockage de carbone (*cf. infra*).

Ces propriétés du sol font partie des variables les plus étudiées dans la littérature rassemblée dans les deux méta-synthèses. Beillouin *et al.* (2021) font état d'un **lien très majoritairement positif entre les différentes formes de diversité végétale et la qualité du sol, mais d'assez faible intensité** : de l'ordre de +5 % en moyenne pour les rotations à +20 % en agroforesterie, les cultures associées ou en relai et plantes compagnes étant dans une situation intermédiaire. A l'opposé, **les mélanges variétaux ne semblent pas corrélés avec la qualité du sol**. Enfin, **le lien entre la présence de végétation semi-naturelle et la qualité du sol est moins documenté mais identifié comme systématiquement positif** dans les synthèses, et quantifié pour les haies de +13 % par rapport à la référence.

Les services de régulation de l'eau en qualité et quantité sont en revanche très peu présents dans le corpus des métasynthèses. Si la **qualité de l'eau semble significativement bien meilleure dans les systèmes présentant un plus haut niveau de diversité interspécifique** (de l'ordre de +60 à +90 % en moyenne), ces estimations moyennes masquent une variabilité très importante entre les méta-analyses primaires considérées. **Le lien entre la régulation quantitative de l'eau et la diversité végétale n'est estimé que pour l'agroforesterie et clairement positif (+45 %)**. En complément, certaines synthèses établissent un lien positif entre ce service écosystémique et les cultures associées ou en relai (Glaze-Corcoran *et al.*, 2020 ; Rosa-Schleich *et al.*, 2019).

Atténuation du changement climatique

Parmi les variables retenues dans les méta-synthèses, les émissions de gaz à effet de serre (GES) et le stockage de carbone dans le sol sont des indicateurs du service d'atténuation du changement climatique. Le **stockage de carbone** fait partie des variables les plus fréquemment mesurées, et son lien avec la diversité végétale est similaire aux estimations réalisées pour la qualité du sol (probablement du fait d'une certaine redondance entre les métriques utilisées) : il est **positivement (mais assez faiblement) corrélé à la diversification interspécifique et aux rotations, et non significatif pour les mélanges variétaux**.

Les **émissions de GES** sont quant à elles plus rarement relevées, et l'analyse statistique n'établit un lien significatif qu'avec les couverts d'interculture. **L'implantation de couverts d'interculture est associée à des émissions de GES en moyenne 29 % plus élevées que dans la situation de référence**. Ce résultat s'expliquerait par une émission de protoxyde d'azote plus importante notamment liée à l'introduction de légumineuses en interculture, à l'incorporation des résidus des cultures dans les sols ou à une plus grande quantité de carbone minéralisable en présence d'un couvert végétal. Cependant, les effets multiples du climat, des pratiques agricoles ou des espèces de plantes cultivées sur les émissions de GES restent encore largement mal connus.

En rassemblant l'ensemble des résultats, les modalités de diversification apparaissent plus ou moins intéressantes vis-à-vis de la biodiversité, de la régulation naturelle des bioagresseurs et de la fourniture d'autres services écosystémiques (Figure 2-4). Cette hiérarchisation s'appuie uniquement sur les résultats des comparaisons entre situations plus ou moins diversifiées. Il ressort que les mélanges de variétés (diversification intra-spécifique intra-parcellaire) ont plutôt des liens neutres ou faibles avec la biodiversité et la fourniture de services (sont représentés ici le stockage de carbone et la qualité des sols, les autres services n'étant renseignés que de façon parcellaire dans les références). À l'inverse, l'agroforesterie, au moins telle que pratiquée en Afrique et en Asie, constitue une modalité de diversification ayant les liens positifs les plus forts avec la biodiversité et la fourniture de services écosystémiques. Si les couverts d'interculture sont très fortement et positivement associés à une meilleure régulation naturelle, ils ont des liens positifs de moins grande intensité avec la biodiversité et la fourniture de services. Ainsi, les couverts d'interculture mais aussi les rotations, les haies et les cultures associées ou en relai se positionnent de façon plutôt « intermédiaire » en termes de bénéfices associés. Enfin, le positionnement relatif des modalités de diversification de la végétation semi-naturelle reste à étudier du fait d'absence d'évaluation quantitative relative dans les méta-synthèses, mais les liens s'avèrent positifs avec la régulation naturelle des bioagresseurs, la biodiversité et la fourniture de services écosystémiques dans la littérature.

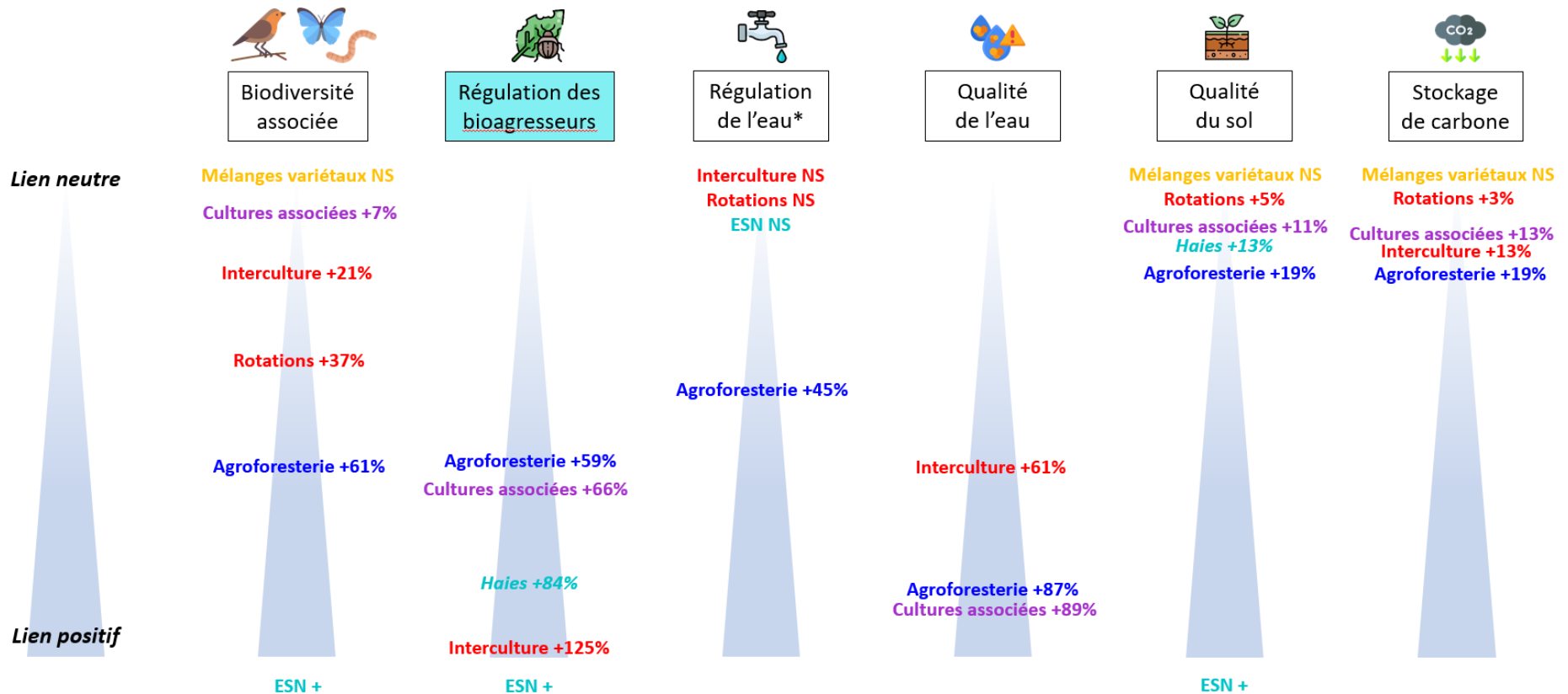


Figure 2-4. Hiérarchisation des modalités de diversification végétale en fonction de leurs liens avec la régulation naturelle des bioagresseurs, la biodiversité associée et la fourniture de services écosystémiques

Source : auteurs à partir des résultats de Tamburini *et al.* (2020) et Beillouin *et al.* (2021).

Seules les catégories de services écosystémiques dont les liens avec la diversité végétale sont suffisamment renseignés sont incluses dans ce schéma (* régulation quantitative de l'eau). Seules les modalités de diversification pour lesquelles des liens sont renseignés apparaissent sur le schéma. La force du lien est indiquée en pourcentage. NS : lien non significatif. Les liens positifs entre les éléments semi-naturels (ESN) et la biodiversité et les services ne sont pas quantifiés, empêchant de les positionner relativement aux autres modalités de diversification.

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

Le rendement dépend d'un ensemble de facteurs, dont l'effet des bioagresseurs, mais également d'autres services écosystémiques favorisés par la diversification (fertilité des sols, pollinisation). D'après les deux méta-synthèses récentes mentionnées ci-dessus, **le lien entre diversité végétale et rendement est généralement positif lorsque la diversification concerne la végétation cultivée (+2 % à 47 %), et neutre lorsqu'elle concerne les éléments semi-naturels**, en comparaison avec des cultures pures (par exemple pour évaluer les effets des mélanges de variétés ou d'espèces) ou des monocultures (par exemple pour évaluer l'effet des rotations). Il est à noter que ces estimations ne prennent pas en compte les éventuels produits liés aux éléments semi-naturels (éléments ligneux) ou de l'agroforesterie (bois de chauffage, fruits, etc.).

Ces tendances se retrouvent dans la littérature mobilisée pour analyser plus spécifiquement les effets de chaque modalité de diversification sur la régulation des bioagresseurs (Section 2.1.1). Ainsi, si de faibles gains de rendement (env. 3%, gains souvent non significatifs) sont observés avec les mélanges de variétés, la littérature souligne la stabilisation interannuelle des rendements recherchée par les agriculteurs lorsqu'ils emploient ces mélanges. Cette littérature témoigne de **gains de rendement notables avec les rotations (10-20 %)**⁶⁵ et **surtout avec les associations d'espèces, au moins pour l'une des espèces composant le mélange (de l'ordre de 20 à 40 % de gain)**, le rendement pouvant être inchangé pour l'autre espèce. Les rendements ne sont globalement pas modifiés par la présence des éléments semi-naturels.

Ces ordres de grandeur, issus de travaux portant sur le monde entier, peuvent toutefois être transposés à la France, en particulier pour les modalités de diversification intra-parcellaire. En effet, ils sont en grande partie confirmés par les travaux économiques portant sur la diversification à finalité de protection des cultures dans des contextes agroécologiques et économiques comparables au contexte français. Même si cette littérature n'est pas très abondante, on peut citer les tendances qu'elle suggère⁶⁶. Les rares études portant sur les **mélanges variétaux** (en grandes cultures) suggèrent un effet neutre (mais stabilisateur) sur le rendement. Le cas des **semences traditionnelles et paysannes** est un peu plus étudié, et la littérature documente des rendements moindres, qui sont à l'origine de l'abandon historique de ces variétés.⁶⁷ Une étude sur l'utilisation de **plantes de services**, sous la forme de couverts végétaux dans les inter-rangs de vigne en substitution à l'usage de glyphosate pour contrôler les adventices montrent que cette pratique est associée à un rendement inférieur. Pour les **mélanges de cultures de rente**, documentés en grande culture, la littérature converge sur des gains de rendements, que ce soit sur des mélanges céréales-légumineuses ou céréales-oléagineux. La littérature économique portant sur la diversification des rotations est plus mitigée au sujet des rendements que la littérature en sciences biologiques et rapporte à la fois des cas d'effet positif, négatifs et neutre sur les rendements. L'importance de l'intention qui préside à la conception de la rotation est soulignée. L'amélioration des rendements de la culture suivante est ainsi observée lorsque la culture introduite permet de casser le cycle d'un bioagresseur ou *via* la biofumigation. A noter que dans le cas de l'introduction d'une nouvelle culture auparavant non assolée par l'agriculteur, une fluctuation du rendement de cette culture peut exister par manque de connaissances sur sa conduite (ce qui incite par exemple les agriculteurs à abandonner les légumineuses lorsqu'ils ne parviennent pas à maîtriser les techniques culturales associées). Les quelques études analysant l'effet des couverts d'interculture sur les rendements documentent des effets plutôt ambigus (parfois négatifs, parfois positifs) très dépendants du contexte. **L'introduction d'éléments semi-naturels** induit plutôt des pertes de production dans les études économiques référencées, essentiellement du fait de la perte de surface cultivée (voir discussion ci-dessous). C'est là une différence avec la littérature biotechnique qui étudie les rendements et non la production.

Ces estimations de gains de rendement à l'hectare sont cependant à mettre en regard de l'impact du déploiement de la diversification végétale sur les superficies dédiées à la production agricole, angle mort de la littérature analysée dans l'ESCO. En effet, la mise en œuvre de certaines modalités de diversification peut

⁶⁵ A noter qu'une synthèse très récente conclut que la **diversification de la rotation par insertion d'une légumineuse** induit un gain de rendement de sur la culture suivant la légumineuse, de +20 % en moyenne à l'échelle mondiale, et de l'ordre de +15 % en contexte européen (Zhao *et al.*, 2022).

⁶⁶ Notons que le mécanisme à l'origine du gain de rendement n'est pas toujours lié au contrôle des bioagresseurs.

⁶⁷ Le regain d'intérêt pour ces variétés est lié à des stratégies de valorisation de niche (voir Section 2.2.1).

entraîner une réduction des surfaces cultivées – comme c’est le cas avec l’implantation d’éléments semi-naturels sur la parcelle –, ou au contraire les « augmenter » – comme avec l’usage de certaines cultures associées. L’indice le plus couramment utilisé pour évaluer la productivité globale des cultures associées est le Land Equivalent Ratio (LER), défini comme la somme des rendements relatifs des espèces composant l’association. Il quantifie la surface qu’il faudrait cultiver avec des cultures pures pour produire autant (et dans les mêmes proportions) que ce qui est produit par un hectare de cultures associées. Un LER supérieur à 1 indique que l’association est plus productive par unité de surface que les cultures pures correspondantes (Figure 2-5). L’ESCO n’a pas conduit de synthèse des études estimant le LER des différents types d’associations culturales. Toutefois, pour illustration, (Dupraz *et al.*, 2010) propose une mesure du LER d’un système agroforestier associant blé dur et peuplier d’une densité d’environ 100 arbres. Considérant différents clones de peupliers et différentes orientations des lignes d’arbres, les auteurs rapportent un LER moyen de 1,3 pour une rotation agroforestière de 13 ans, avec un rendement relatif de la culture de 0,50, et un rendement relatif des arbres (sur l’ensemble de leur cycle de vie) de 0,83. Cela signifie que la production de blé est réduite de moitié mais que l’intérêt du système réside dans la production complémentaire de bois, avec pour conséquence une production supérieure à celle obtenue dans deux systèmes monospécifiques.

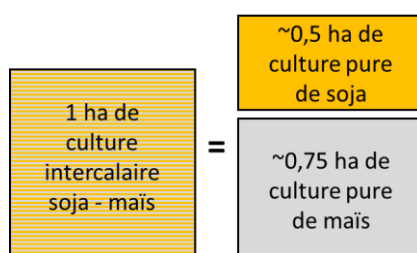


Figure 2-5. Illustration du ratio d'équivalence des terres (LER). D'après Van der Werf (2021).

On suppose que le rendement en culture pure du maïs est de $12 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ et celui du soja de $3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Supposons maintenant qu'une culture intercalaire avec 50 % de maïs et 50 % de soja ait un rendement de $9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de maïs et un rendement de $1,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de soja. Pour obtenir les mêmes rendements avec des cultures uniques, il faudrait $0,75 \text{ ha}$ de maïs et $0,5 \text{ ha}$ de soja. Le rapport d'équivalence des terres est donc de 1,25. La culture intercalaire utilise 20 % de terres en moins que ce qui est nécessaire pour obtenir le même rendement avec des cultures uniques.

2.2. Les conditions de déploiement de la diversification végétale des espaces agricoles à des fins de protection des cultures

Introduction

L'exploitation agricole est le niveau d'organisation central du système socioéconomique⁶⁸ auquel l'agriculteur prend les décisions en matière de choix de cultures et d'itinéraires culturaux. Elle se situe schématiquement sur un axe vertical matérialisant les acteurs des filières dans lesquelles elle s'inclue, et sur un axe horizontal qui positionne les acteurs gérant des entités spatiales façonnant le paysage agricole (Figure 2-6). Tous ces acteurs interagissent dans un contexte général régi par des normes économiques, sociales et institutionnelles.

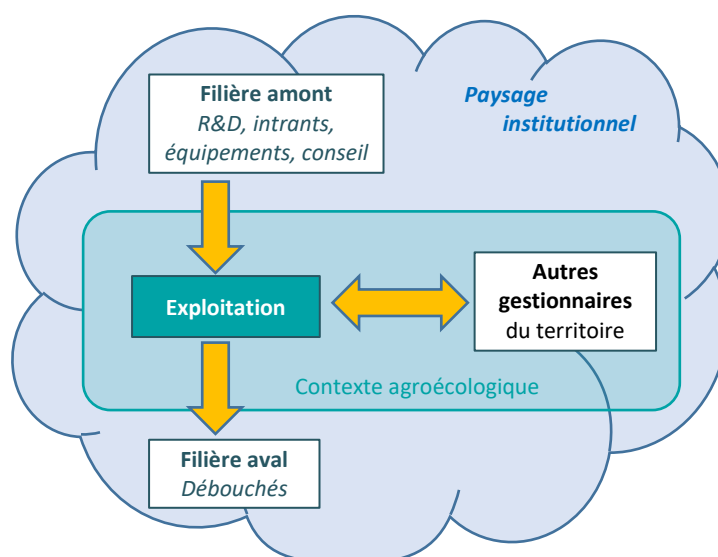


Figure 2-6. Illustration schématique des différents niveaux d'organisation socio-économiques considérés dans l'ESCO. Source : auteurs.

R&D : recherche et développement

Le principal déterminant des choix d'orientation des productions, d'assolement des cultures et d'utilisation d'intrants variables (e.g., pesticides, engrais, semences, travail salarié) et fixes (e.g., machines, bâtiments, terre, travail familial) est d'ordre économique. L'agriculteur cherche à **assurer la rentabilité de l'activité productrice** en générant des bénéfices économiques, tout en limitant le caractère aléatoire de ces bénéfices. Cet objectif interagit avec des motivations non-économiques propres à l'agriculteur (comme les préférences environnementales, les normes sociales ou les effets de pairs) et les caractéristiques biophysiques et agronomiques spécifiques à l'exploitation qui limitent les possibilités de l'agriculteur : topographie, conditions pédoclimatiques locales, structure du parcellaire, complémentarités entre ateliers de l'exploitation (par exemple, alimentation des troupeaux en cultures fourragères).

Les décisions d'un agriculteur dépendent plus largement de ses interactions avec les acteurs de l'amont et de l'aval des filières dans lesquelles ses productions s'insèrent. Les acteurs de l'amont conditionnent la disponibilité et l'accès aux intrants (notamment semences et plants, pesticides) et aux équipements, ainsi que l'offre de conseil, notamment sur la conduite et la protection des cultures. En aval, la structuration des filières agricole est très différente selon les débouchés : vente en frais ou vente pour la transformation pour les fruits et légumes ; transformation basée sur le fractionnement et l'assemblage pour une part importante de la production de grandes cultures ; filières spécifiques basées sur des labels et des cahiers des charges. Selon les

⁶⁸ Le terme socioéconomique renvoie aux interactions entre les dimensions sociales, économiques et techniques des systèmes agricoles et agroalimentaires.

cas, les attentes en termes de quantité et/ou de qualité (visuelle, organoleptique, nutritionnelle...) des produits peuvent être très différentes, ce qui peut contraindre fortement les choix de production des agriculteurs.

Les pouvoirs publics, en tant que régulateur, jouent également un rôle important dans ces choix, en influençant le contexte réglementaire et en mettant en place des politiques publiques contraignantes ou incitatives (cf. Section 2.2.3). Ces politiques répondent à des enjeux divers. Une première raison de réguler est la volonté de limiter les externalités négatives des activités agricoles (par exemple la pollution liée à l'usage des intrants chimiques) ou de favoriser leurs externalités positives (par exemple la préservation de la biodiversité). La régulation peut également avoir pour objectif d'améliorer le fonctionnement d'un marché, en favorisant l'innovation ou les interactions entre acteurs dans les filières, ou de coordonner les actions des agents dans les territoires pour favoriser la production collective de biens publics ou la régulation de l'usage de biens communs. Enfin, le régulateur peut vouloir soutenir certains acteurs ou activités (comme la production agricole) dans une perspective politique.

Les systèmes conventionnels qui dominent actuellement les modes de production agricoles sont le résultat d'une coévolution des connaissances, des pratiques et des organisations au sein des filières. Ces **systèmes** se sont **spécialisés par des mécanismes d'auto-renforcement entre différents niveaux d'organisation socio-économiques**, conduisant à des verrouillages à tous niveaux. Ces verrous sont hérités de l'évolution passée des systèmes agricoles, liée à la modernisation de l'agriculture.

La diversification des cultures dans le temps et l'espace a longtemps été le moyen principal pour les agriculteurs de gérer la fertilité des sols et de réguler la pression des bioagresseurs. L'avènement des intrants chimiques a cependant rompu ces liens en permettant à la fois de simplifier et d'alléger le travail, de lever les verrous agronomiques (limitant l'allocation des sols à certaines cultures plutôt qu'à d'autres), et de gérer les risques de production à bas coût. Dans le même temps, le progrès génétique s'est orienté sur la sélection de variétés permettant d'obtenir des rendements élevés car exprimant leur plein potentiel dans les systèmes reposant sur l'usage de ces intrants. Une spécialisation s'est alors opérée à toutes les échelles, renforcée par un paradigme de performance économique basée sur les économies d'échelle à tous les niveaux :

- Au niveau de l'exploitation, les rotations ont pu se **spécialiser sur les cultures les plus rentables**, générant ainsi des économies d'échelle, qui consistent en une réduction des coûts unitaires de production et de la complexité de gestion de l'exploitation lorsque les volumes produits d'une même culture augmentent. Outre l'appauvrissement des savoirs des agriculteurs, cette spécialisation a induit une **réduction de la diversité paysagère**, d'une part du fait du développement d'assolements plus homogènes, et d'autre part du fait de la suppression des haies et des éléments semi-naturels interstitiels pour l'agrandissement des parcelles.
- Les économies d'échelles jouant également dans les filières, ces dernières se sont organisées pour maximiser la production d'un **nombre réduit d'espèces cultivées** en concentrant sur ces dernières les efforts de recherche (sélection variétale), le conseil, la vente de semences et d'intrants, la récolte et le stockage, tout en améliorant leurs débouchés grâce à des volumes importants de produits homogènes dont la valorisation par l'agro-industrie et la distribution en grandes et moyennes surfaces sont portées par la **standardisation des produits alimentaires**. Les coopératives agricoles ont joué un rôle pivot dans ces évolutions, en se positionnant à plusieurs niveaux d'activité de la filière (multiplication des semences, distribution d'intrants (semences, engrais, pesticides, etc.), collecte des produits agricoles et conseil) leur permettant d'opérer des ajustements entre l'amont et l'aval. Certaines activités ont subi un mouvement de **privatisation** : c'est le cas notamment des activités de conseil et de sélection génétique, qui sont passées d'une dominance d'institutions publiques à une dominance des opérateurs privés. Au sein des institutions de recherche, l'évolution des manières de penser et de produire des connaissances en agronomie a conduit à une déconnection de la recherche par rapport à la complexité du terrain et à un morcellement des connaissances entre disciplines interagissant peu.
- Cette spécialisation s'est opérée jusqu'à l'échelle des régions (voire des pays), avec notamment une **séparation géographique des productions végétales et animales** (excepté dans les systèmes de polyculture-élevage qui perdurent dans des zones à faible potentiel en termes de production céréalière) donc une spécialisation des acteurs locaux des filières amont et aval.

Cette spécialisation a été initiée et accompagnée par des politiques publiques européennes et nationales de soutien aux cultures majoritaires (céréales, oléagineux, lait, betterave) *via* des prix garantis dans les premières versions de la Politique agricole commune puis le soutien au revenu des exploitations couplé à certaines

productions jusqu'à la fin du XX^e siècle. Dans le prolongement de la politique européenne, la réglementation française a accompagné la modernisation du secteur agricole vers une agriculture d'entreprise professionnelle, en organisant la rationalisation du foncier (regroupement des parcelles, suppression des obstacles). L'exportation prenant une place importante dans les débouchés de la production agricole française, des normes se sont développées favorisant la standardisation des produits voués à des marchés de plus en plus internationaux.

Le système actuel est donc caractérisé par une spécialisation à tous les niveaux des filières et dans les territoires, provoquant un **verrouillage systémique** qui s'oppose à la diversification. En conséquence, le déploiement des stratégies de protection des cultures reposant sur la diversification appelle des changements systémiques à l'échelle de l'ensemble des systèmes alimentaires.

En marge du modèle dominant, il existe cependant des initiatives localisées de construction de petites filières alternatives, qui se sont maintenues ou développées sur de petites surfaces ou dans des territoires présentant des potentialités agronomiques faibles. Elles reposent sur des systèmes techniques alternatifs au modèle conventionnel (agriculture biologique, maraîchage sur sol vivant, etc.) reconnectant de façon originale les productions végétales et animales, ou la production et la fourniture d'intrants, ou la production et la consommation. On peut citer par exemple (i) la démarche de développement de débouchés pour les légumineuses favorisant leur réintroduction dans des systèmes de grandes cultures, (ii) la sélection participative de variétés paysannes aboutissant à la production de semences adaptées localement et plus résistantes aux bioagresseurs, (iii) le développement d'échanges de matière et de services (pâturage) entre agriculteurs et éleveurs. Ces initiatives répondent souvent à un ensemble d'enjeux parmi lesquels la réduction du recours aux pesticides. L'analyse de la façon dont elles s'insèrent dans les filières amont et aval peut donner des clefs pour comprendre les déterminants du développement et/ou de la meilleure prise en compte de la diversité végétale pour protéger les cultures.

Démarche adoptée pour la synthèse des connaissances

Compte tenu de ce cadre général de prise de décisions par les agriculteurs, l'ESCO s'est attachée à analyser la littérature traitant plus spécifiquement des conditions d'adoption des pratiques de diversification dans le but de protéger les cultures. Contrairement à l'analyse des effets de la diversité végétale sur la régulation naturelle des bioagresseurs, la biodiversité et la fourniture d'autres services écosystémiques, cette revue de la littérature se limite aux travaux conduits en contexte Européen ou équivalent (Amérique du Nord essentiellement). En effet, des systèmes diversifiés déployés dans des contextes économique (structuration des filières, des marchés, etc.) et institutionnels (politiques publiques, cadre juridique) trop éloignés de ceux qui caractérisent l'Europe renseignent peu sur les conditions d'adoption de telles pratiques en France.

Deux grandes questions socio-économiques sont généralement traitées dans cette littérature. La première porte sur l'évaluation de la rentabilité de ces pratiques, le plus souvent estimée au niveau de la parcelle et en comparaison avec des systèmes moins diversifiés. La seconde porte sur les facteurs d'adoption qui dépassent généralement l'échelle de l'exploitation agricole pour couvrir l'ensemble de la filière depuis la fourniture d'intrants ou d'agroéquipements jusqu'à la gestion des débouchés. Les résultats de ces travaux sont cohérents avec les conclusions de l'étude Inra portant plus généralement sur la diversification des cultures, sans lien spécifique avec l'enjeu de protection des cultures (Meynard *et al*, 2013).

En complément, la littérature décrivant les instruments politiques (principalement les dispositifs de la Politique agricole commune) et le cadre réglementaire en vigueur a été mobilisée pour analyser la manière dont ils influent sur le déploiement de la diversification végétale. Il faut noter que les politiques publiques ne considèrent pas explicitement la diversification *en lien avec l'objectif de protection des cultures*. De plus, la littérature académique étant très peu abondante sur cette question, des rapports non académiques et de la littérature grise, souvent récente, ont été inclus dans le corpus bibliographique afin de documenter les possibles effets des dispositions de la Politique agricole commune de 2023 et du Plan stratégique national (PSN) français sur le déploiement de la diversification végétale. Les aspects juridiques et réglementaires français susceptibles d'avoir un impact sur le déploiement de la diversification végétale ont quant à eux été traités en s'appuyant sur une littérature publiée plutôt dans des revues françaises de droit, ainsi que des documents non académiques relatifs au droit du code rural et civil.

2.2.1. 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, la dimension économique influençant fortement les choix des agriculteurs (*cf. supra*).

Une exploitation agricole est rentable lorsque les recettes issues de la vente de la production sont supérieures aux coûts de production. Le montant des recettes dépend du volume de production (résultante du rendement de chaque culture et de la surface qui lui est allouée) et des prix de vente des produits (qui dépendent des débouchés)⁶⁹. Les coûts de production incluent l'ensemble de coûts propres aux différentes productions (intrants) et ceux liés au fonctionnement de l'exploitation (équipement, frais généraux, travail salarié).

C'est à partir de cette rentabilité que l'agriculteur pourra générer un revenu et/ou investir pour son exploitation. Or, l'adoption d'une pratique de diversification est susceptible d'affecter (positivement ou négativement) l'ensemble des composantes de la rentabilité, schématisées dans la Figure 2-7⁷⁰. Notons que les aides publiques (globales ou associées à une culture) peuvent augmenter les recettes (et le revenu), mais ne sont pas explicitement représentées dans la Figure, car cette dimension est discutée en Section 2.2.3. La rentabilité hors aides publiques donne une indication sur le rôle des dynamiques économiques au sein des filières sur le comportement des agriculteurs.

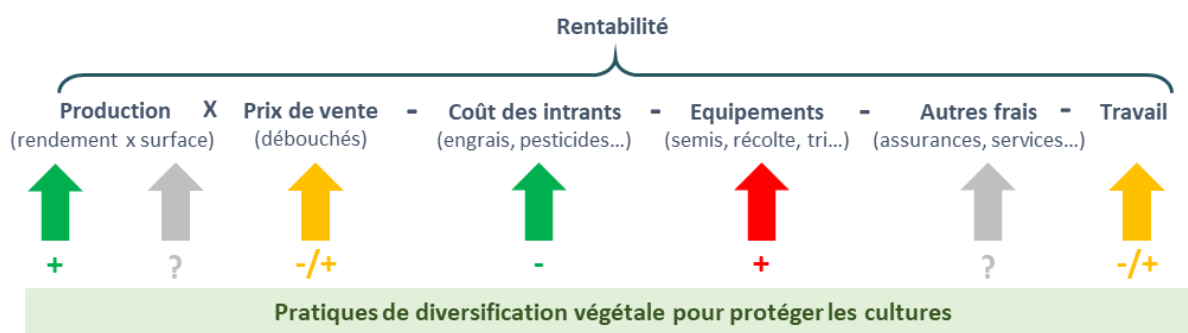


Figure 2-7. Représentation schématique des facteurs qui entrent dans le calcul de la rentabilité d'une exploitation agricole, et de la façon dont l'adoption de pratiques de diversification végétale affecte la rentabilité. Source : auteurs.

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

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

Peu de travaux évaluent les impacts économiques, pour l'exploitation agricole, **de la diversification végétale** en lien spécifique avec l'enjeu de protection des cultures. La rentabilité de tels systèmes est d'autant plus difficile à estimer que les modalités de diversification étudiées affectent une grande partie des déterminants de la rentabilité dans des directions (et des magnitudes) diverses. De plus, les pratiques de diversification végétale sont souvent associées à d'autres pratiques basées sur des principes agroécologiques (par exemple pratiques liées à l'amélioration du sol), elles-mêmes jouant sur la rentabilité. Cela rend difficile l'identification des effets spécifiques de la diversification végétale sur la rentabilité. Nous avons détaillé les effets sur le rendement dans la Section 2.1.3, mais la diversification peut aussi affecter les surfaces allouées à chaque culture, ainsi que le prix de vente des produits (positivement ou négativement) en modifiant leur qualité et donc leurs débouchés potentiels. Elle peut induire des économies d'intrants (de pesticides, notamment), mais occasionner des dépenses supplémentaires en équipement (location de matériel, sous-traitance). Elle peut modifier les besoins en assurance ou en conseil, et donc les coûts associés. L'effet sur le travail peut être ambigu, avec une

⁶⁹ Les recettes pourraient inclure d'autres sources, comme les revenus locatifs pour du matériel ou de la terre, le travail pour un tiers, etc. Ces éléments ne sont pas considérés ici.

⁷⁰ La rentabilité est ici définie comme l'Excédent Brut d'Exploitation. Le schéma simplifie volontairement les déterminants de son calcul.

augmentation de la complexité des tâches (et des besoins de connaissances), mais aussi possiblement un écrêtage des pics de la charge de travail. Au final, l'effet combiné sur la rentabilité de l'exploitation sera contingent, et **aucun résultat générique** ne peut être déduit a priori.

Cette limite étant soulignée, il est tout de même possible de donner quelques indications sur ce que la littérature dit sur ce sujet, même si ces résultats sont à prendre avec toutes les précautions relatives à leur manque de réplication.

À l'échelle intra-parcellaire, les articles étudiant l'adoption de **mélanges variétaux** de semences certifiées concluent que cette modalité de diversification ne semble pas affecter significativement la rentabilité de l'exploitation, mais peut stabiliser les revenus. Le cas des **semences paysannes / variétés traditionnelles en grandes cultures** est intéressant car, bien qu'associé à des rendements moindres et à un manque de rentabilité en général, il peut donner lieu à une production **rentable dans des stratégies de niche**, lorsque l'agriculteur contrôle la distribution de sa production en circuit court, soit par une activité jointe de transformation (ex : meunerie et boulangerie paysanne), soit par l'association avec des utilisateurs (restaurateurs, consommateurs finaux dans une Association pour le Maintien d'une Agriculture Paysanne, etc.) qui valorisent les produits issus de ces variétés pour leurs qualités particulières : propriétés organoleptiques, proximité de l'approvisionnement, saisonnalité, mode de production respectueux de l'environnement, etc. La diversification dans le maraîchage peut bénéficier des mêmes stratégies de vente directe ou de circuit court, canaux de distribution dans lesquels les consommateurs sont parfois moins exigeants sur l'aspect visuel des fruits et légumes que les distributeurs de grandes et moyennes surfaces. Les quelques articles étudiant la rentabilité des **plantes de services** concluent à une faible rentabilité. Enfin, la modalité de diversification la plus étudiée est le **mélange de cultures de rentes**, qui s'avère rentable en dépit des surcoûts liés aux agroéquipements (pour le semis, la récolte et le tri notamment).

Au niveau de l'exploitation, la **diversification des rotations et des assolements** par l'introduction d'une nouvelle culture (en général, une culture mineure) donne des résultats très variables (quelques effets positifs, parfois négatifs, souvent neutres), en fonction des cas d'étude. La non-rentabilité vient généralement du fait qu'introduire de nouvelles cultures dans des systèmes de production actuellement spécialisés sur les cultures les plus rentables suppose de fait d'assoler des cultures plutôt moins rentables (notamment en raison de débouchés limités et/ou d'efforts de recherche et développement peu soutenus sur leur productivité). L'absence de rentabilité est aussi expliquée par le manque de connaissances de l'agriculteur pour la conduite de ces nouvelles cultures. De même, **l'implantation d'éléments semis-naturels** n'est pas jugée rentable sans subventions, du moins à court terme.

Par ailleurs, l'analyse de cette littérature permet de tirer quelques enseignements généraux sur certains déterminants de la rentabilité. Les modalités de diversification végétale étudiées sont globalement **plus performantes économiquement en contexte de forte pression de bioagresseurs**. Ce résultat est à mettre en regard avec les effets agroécologiques présentés dans la Section 2.1.1, ainsi qu'à l'effet de stabilisation des rendements présenté dans la Section 2.1.3. Par ailleurs, la performance économique de nombreuses modalités de diversification végétale est aussi plus importante **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 ou de **coût des intrants élevés**, qui permettent d'une part de réduire les effets d'une éventuelle perte de rendement et de renforcer les effets « économies d'intrant ». Enfin, sur certaines modalités de diversification et certaines cultures, la rentabilité est rendue possible par des **stratégies de niche** (valorisation en circuit court, en s'appuyant sur des caractéristiques de qualité des produits, etc.) (cf. *supra*), ce qui peut limiter les perspectives de déploiement à grande échelle.

On peut également noter de cette littérature que, même pour les modalités de diversification jugées rentables au niveau de l'exploitation, les études soulignent que les gains potentiels par rapport à un système de production conventionnel sont généralement insuffisants pour inciter l'agriculteur à affronter les verrous qu'il peut rencontrer pour mettre en œuvre cette diversification. Ces verrous sont liés à l'organisation sociotechnique des filières et aux interactions entre acteurs au sein des territoires. Ils sont discutés dans la Section 2.2.2.

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

- Le **délai et/ou le caractère pluriannuel des effets agroécologiques induits par la diversification végétale** : Le fait que les mécanismes de régulation naturelle des bioagresseurs ne soient pleinement effectifs qu'à moyen/long-terme (en particulier pour les éléments semi-naturels) plaide pour une analyse à long-terme de la rentabilité de la diversification. Par ailleurs, certains travaux de synthèse

suggèrent que les systèmes plus diversifiés offrent des **performances plus stables** dans le temps, ce qui est un avantage certain dans les conditions actuelles et à venir de variabilité météorologique forte, et représente un intérêt particulier pour les agriculteurs averses au risque, qui accordent de l'importance à une telle stabilité.

- La **multiplicité des effets / externalités positives**, qui s'expriment au-delà des frontières de l'exploitation agricole, et qui ne se résument pas à la régulation des bioagresseurs. La diversification mise en œuvre dans une exploitation, en plus d'affecter la rentabilité de celle-ci, peut avoir des effets économiques sur la rentabilité des exploitations voisines, en permettant une régulation des bioagresseurs à l'échelle du paysage. Ces effets ne sont pas pris en compte dans un calcul de rentabilité à l'échelle de l'exploitation. Par ailleurs, la diversification peut augmenter la fourniture de certains services écosystémiques (cf. Section 2.1.2) qui bénéficient à la société, et dont la valeur n'est pas prise en compte dans un calcul de rentabilité. Par exemple, si les analyses coûts-bénéfices des éléments semi-naturels comme les haies tendent à démontrer qu'elles ne sont pas rentables, aucune étude (à l'exception de celle de Morandin *et al.*, 2016) ne prend en compte les bénéfices des économies de pesticides associées, ni le gain en termes de fourniture d'autres services écosystémiques (pollinisation, fertilisation) qui peuvent bénéficier à d'autres acteurs du territoire. Ainsi, certains des services écosystémiques rendus par les éléments semi-naturels ne génèrent pas de revenus pour l'agriculteur *via* l'activité de production agricole, mais pourraient justifier des paiements pour services environnementaux dont la prise en compte dans le calcul de la rentabilité réduirait fortement les délais de retour sur investissement⁷¹. La littérature mentionne ainsi l'intérêt des incitations financières à la diversification, justifiées, entre autres, par les effets bénéfiques de la diversification sur l'environnement et la biodiversité. De telles incitations peuvent être mises en œuvre par des politiques publiques (*via* la Politique agricole commune notamment, cf. Section 2.2.3) ou par des mécanismes de marché. Une certification pertinente pour les éléments semi-naturels paraît celle associée au stockage du carbone. Le label « bas carbone » initié en 2018 permet de certifier les économies d'émission de gaz à effet de serre et le stockage du carbone que réalisent les exploitations agricoles, et de les valoriser par des crédits carbones pouvant être rémunérés par des acteurs privés ou publics, ou vendus sur des marchés de compensation carbone. Cette certification demeure cependant largement inachevée et doit être appropriée par les acteurs pour conduire à un véritable financement de l'implantation d'éléments semi-naturels.

Ces éléments plaident en faveur d'une modification de la manière d'appréhender la rentabilité des pratiques et des systèmes de production, en incluant la dimension pluriannuelle des bénéfices de la diversification végétale et le fait qu'une partie d'entre eux s'expriment au-delà de l'exploitation. Cette réflexion reste à conduire, en particulier dans le cas des systèmes diversifiés. De même, se pose la question de la manière d'intégrer les effets négatifs des stratégies de protection des cultures basées sur des pesticides de synthèse dans le calcul de la rentabilité « sociale » des modes de production les utilisant. Ces questions sont liées au rôle des politiques publiques, discuté en Section 2.2.3.

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

Bien que la littérature porte davantage sur certaines modalités de diversification (mélanges de variétés et d'espèces, rotations) au détriment des autres (notamment les éléments semi-naturels), les verrous et leviers au déploiement de stratégies de protection des cultures reposant sur la diversification végétale sont, dans leur nature, rarement spécifiques à une modalité de diversification végétale en particulier. **La littérature est cependant en quantité insuffisante pour permettre de hiérarchiser systématiquement le poids de chacun d'entre eux dans l'adoption des différentes pratiques de diversification.**

⁷¹ Morandin *et al.* (2016) calculent, avec une analyse coût-bénéfice, la rentabilité économique des haies adjacentes à des champs de tomate en Californie. Considérant que les haies permettent à l'agriculteur de réduire l'utilisation d'insecticides par leur effet favorable sur la régulation des bioagresseurs, les auteurs estiment que le coût d'établissement d'une haie et son emprise foncière sont compensés par le service de régulation des insectes ravageurs au bout de 16 années. Si l'on prend en compte d'autres services écosystémiques, par exemple le service de pollinisation assuré par les pollinisateurs sauvages, le temps de retour sur investissement est abaissé à 7 ans.

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

En amont de l'exploitation agricole, la **disponibilité en semences et en plants performants (sur les plans agronomique et économique)⁷² en contexte diversifié et adaptés aux divers contextes pédoclimatiques et agronomiques des exploitations** est l'un des facteurs les plus fréquemment évoqués dans la littérature. Il influe de façon univoque le déploiement de la plupart des pratiques de diversification.

Tout d'abord, la dynamique d'innovation variétale dépend des investissements consentis en sélection génétique, eux-mêmes liés à la taille des marchés de chaque espèce/produit. Ainsi, une espèce ou une variété dont les propriétés technologiques ou organoleptiques ne représentent pas des marchés de grande taille tendent à être délaissées par les sélectionneurs. L'offre variétale restreinte pour les espèces de niche (par exemple en grandes cultures : chanvre, épeautre, etc.) limite ainsi les possibilités de **diversification des rotations par introduction d'une nouvelle culture**. Pour illustration, seulement 6 variétés de fèves, une variété de lupin, une variété de moutarde ont été enregistrées par le GEVES entre 2009 et 2012 (et aucune de pois chiche et de chanvre) contre 139 variétés de blé et 360 de maïs (Magrini *et al.*, 2016). Lorsque des variétés sont disponibles pour les espèces de niche, elles présentent souvent des performances insuffisantes en termes de taux de levée, de niveau et de stabilité de rendement, de résistance à certains bioagresseurs et à la verse.

Pour les espèces dites « majoritaires », un large choix de variétés ne préjuge pas de leur performance lorsqu'elles sont utilisées en système diversifié, notamment en **mélange (variétal ou d'espèces)**. D'une part, les variétés disponibles ont été (et continuent d'être) sélectionnées pour leur valeur en culture pure, et dans des modes de conduite conventionnels. Leur performance en mélange ne fait pas partie des objectifs de sélection. Or, les traits recherchés en mélange sont différents de ceux recherchés en culture pure. Par exemple, la résistance du pois à la verse est importante en culture pure, mais pas en mélange avec l'orge, cette dernière soutenant le pois ; de même, une graminée utilisée comme plante de service doit avoir un enracinement limité et une dormance estivale pour limiter la concurrence avec la culture principale, des caractères généralement contre-sélectionnés dans le cas des graminées, si bien qu'il est intéressant d'utiliser du matériel génétique ancien (et moins sélectionné). La culture principale doit quant à elle présenter des caractères spécifiques pour une bonne combinaison avec la plante de service (par exemple, la réaction aux effets d'ombrage). D'autre part, une offre pléthorique de variétés mises en marché rend plus difficile le choix des variétés à associer pour obtenir l'effet escompté. Si les agriculteurs et les organismes de recherche et développement peuvent utiliser l'expérimentation pour comparer différents mélanges, ceci n'est donc possible que sur une pré-sélection de mélanges. Des démarches participatives d'idéotypage ont été mises en œuvre en France pour travailler sur cette pré-sélection en cultures céréalières et des travaux de recherche sont conduits pour développer des règles d'assemblage des variétés pour satisfaire les objectifs de production des agriculteurs. Dans un objectif de production agroécologique, certains auteurs recommandent plus globalement que la sélection variétale vise le rétablissement d'une diversité plus grande au sein du pool de variétés cultivées (Chacon-Labela *et al.*, 2019).

Pour contrer ces freins, outre le nécessaire **investissement dans l'effort de sélection**, le **partage d'expérience et l'échange de semences** entre agriculteurs (possiblement associé à de la sélection participative ou de la sélection de variétés population) peuvent jouer un rôle important dans certaines filières ou territoires.

L'offre d'agroéquipements adaptés à des cultures diversifiées fait également défaut pour déployer certaines modalités de diversification et/ou pour valoriser la production issue de ces systèmes. C'est notamment le cas pour les **associations de cultures de rente**, pour lesquelles le besoin en équipement spécifique constitue le verrou le plus fréquemment cité dans la littérature analysée, ainsi que pour la **diversification des rotations par introduction d'une culture de niche** et pour l'**entretien des éléments semi-naturels** (bien que la littérature concernant ces derniers soit très pauvre).

Concernant les **mélanges de cultures**, la plupart des équipements de semis et de récolte ont été développés pour mécaniser la production de cultures pures et ne sont pas nécessairement adaptés à la production de cultures en mélange. Des équipements (ou adaptations) spécifiques peuvent ainsi être nécessaires pour semer des graines de tailles différentes et les implanter à des profondeurs différentes. Une offre pour ce type de semoir existe mais leur coût est relativement élevé en comparaison des semoirs classiques du fait de leur complexité et de leur production à petite échelle. Pour la récolte, les moissonneuses-batteuses disponibles sur le marché

⁷² La performance est multidimensionnelle : elle recouvre le potentiel de rendement, l'adaptation au milieu, la résistance aux stress biotiques (bioagresseurs), des caractéristiques qualitatives des produits, etc.

permettent de récolter une large diversité d'associations mais leur réglage à l'optimum nécessite une certaine compétence technique, et doit tenir compte des impératifs de tri post récolte (sachant que le plus souvent les mélanges « faciles » à récolter – par exemple deux espèces dont les grains sont de taille similaire – sont les plus difficiles à trier, et inversement). La problématique est similaire pour l'**introduction d'une culture de diversification**, comme l'illustrent les cas du lin et du chanvre, deux espèces pour lesquelles les graines et les fibres sont récoltées simultanément mais vouées à des usages différents (industriel et textile).

Le partage des équipements, qu'il prenne la forme d'achats groupés au sein de Coopératives d'utilisation de matériel agricole (CUMA) ou de prestations de services réalisées par d'autres agriculteurs (Entreprises de travaux agricoles) est cité comme un levier, en permettant de mutualiser les investissements. Toutefois, la mise en commun de matériel impose la coordination des utilisateurs pour optimiser la planification des opérations, notamment le semis. Posséder son propre matériel reste plus pratique pour un agriculteur, mais également plus coûteux, à moins d'allouer une surface minimale de la surface agricole utilisée de l'exploitation à chaque espèce de diversification pour rentabiliser les investissements. Le développement de l'auto-construction de matériel par les agriculteurs (pour apporter des adaptations au matériel existant) est aussi un levier pour faire diminuer le coût des équipements.

La littérature mentionne également souvent un **manque de connaissances (à la fois des agriculteurs et des conseillers), de références technico-économiques et de conseil (sous toutes ses formes)** pour la conduite des systèmes diversifiés. Ceci alimente l'incertitude des agriculteurs sur les intérêts de la diversification (notamment son efficacité vis-à-vis des bioagresseurs), les rendements atteignables et la valorisation de la production. Ces incertitudes empêchent les agriculteurs d'estimer la possible rentabilité économique de leur système (cf. *supra*). Ce verrou concerne la totalité des modalités de diversification végétale. Il est d'autant plus problématique qu'une inscription durable des pratiques de diversification au sein de l'exploitation est conditionnée à la capacité de l'agriculteur à bien gérer techniquement les couverts cultivés. Outre le manque de connaissances, la littérature invoque la diversité des sources de conseil en France (conseillers privés, coopératives, instituts techniques, chambres d'agriculture) et leur absence de coordination conduisant parfois à des conseils contradictoires.

Les raisons du manque de références techniques sont de plusieurs ordres. D'une part, de façon similaire à ce qui est observé précédemment en amélioration variétale, le modèle économique des Instituts techniques (dont le financement est corrélé aux volumes récoltés pour chaque culture) les incite à travailler en priorité sur les cultures et systèmes majoritaires, ce qui induit un défaut de connaissances sur les **cultures de niche** et sur les **systèmes présentant un niveau de complexité relativement élevé** (rotations et assolements très diversifiées, agroforesterie). D'autre part, les travaux portant sur le conseil au sujet des rotations soulignent le manque d'acquisition de références à l'échelle du système dans son ensemble : seule la performance d'une culture focale est évaluée, sans tenir compte, par exemple, de ses effets sur celle qui lui succède. La performance ainsi estimée néglige une partie des effets liés à la pratique de diversification (cf. Section 2.2.1).

Pour les modalités de **diversification reposant sur la végétation semi-naturelle** (implantation de haies, mise en place d'une prairie, agroforesterie), les connaissances qui peuvent manquer à l'agriculteur sont celles relatives au cadre réglementaire applicable à la gestion de cette végétation, majoritairement pérenne, au délai de retour sur investissement, et aux services écosystémiques qu'elle rend. Ce dernier point est d'autant plus important que l'implantation d'éléments semi-naturels « non productifs » au sein de l'exploitation se heurte, d'une part, au coût élevé d'installation de ces éléments, et, d'autre part, à la norme sociale rurale, très attachée à la fonction productrice de l'agriculteur et à des parcelles agricoles « propres » à la composition homogène.

Outre **des investissements accrus dans la recherche & développement et le conseil**, plusieurs leviers sont mentionnés pour favoriser l'acquisition et/ou le partage de références. L'**expérimentation à la ferme** facilite l'apprentissage progressif d'une pratique, et son adaptation pas à pas aux caractéristiques des exploitations où elles sont mises en œuvre, mais elle doit être accompagnée pour plus d'efficacité. L'insertion d'un agriculteur dans un **réseau de pairs**, afin de pouvoir partager des connaissances, apporte une réponse au manque de références fournies par les autres acteurs du développement agricole. La **recherche** a également un rôle à jouer pour fournir des outils d'évaluation des effets des pratiques de diversification afin d'informer les agriculteurs sur leurs intérêts. Enfin, les **outils d'aide à la décision** à destination des agriculteurs constituent également un levier important, pouvant également contribuer à alléger la charge mentale associée à la complexité de conception et de pilotage de certaines modalités de diversification végétale, telles que la diversification des rotations. DECI-FLORSYS est un exemple de ce type d'outil (Colbach *et al.*, 2021). Adossé au modèle FLORSYS, il permet d'évaluer les effets d'une gamme de systèmes de culture sur le contrôle des adventices.

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

En aval de l'exploitation agricole, le **manque de débouchés pour les produits issus des systèmes diversifiés est un autre verrou récurrent**.

Dans le cas des grandes cultures, les process de transformation des matières premières végétales utilisés dans les filières standards exigent certaines caractéristiques technologiques qui ne peuvent être obtenues dans des systèmes diversifiés. Ainsi, les exigences qualitatives et la pureté variétale imposées par la meunerie constituent un frein à l'adoption des **mélanges variétaux**, des **variétés traditionnelles ou paysannes** et des **associations de cultures de rente**, et ce d'autant plus que ce débouché présente actuellement une valeur ajoutée bien supérieure aux autres. On note également peu de débouchés pour les productions mélangées si elles ne sont pas triées (par exemple association céréale-légumineuse), à l'exception de certains circuits de commercialisation tels que les magasins bio. De même, une valeur commerciale relativement faible d'une **culture de niche** peut conduire les coopératives agricoles à ne pas l'inclure dans leur stratégie commerciale (c'est par exemple le cas des légumineuses). Le manque de données technico-économiques souligné précédemment au sujet des performances des cultures de niche (qualités nutritionnelles, intérêts environnementaux, rentabilité) affecte également le développement de débouchés, en créant de l'incertitude pour les industries qui seraient susceptibles de les commercialiser.

Dans le cas du maraîchage et de l'arboriculture, les produits doivent satisfaire des standards stricts de qualité (calibre et apparence, notamment) et de volume à des dates de maturité données pour rentrer dans les filières de distribution en grandes et moyennes surfaces. Or la **diversification des cultures maraîchères** peut induire (i) une maîtrise suboptimale des techniques culturales durant les premières années suivant l'introduction des nouvelles cultures, induisant des défauts visuels sur les produits, (ii) une modification des calendriers de culture, entraînant une inadéquation avec les demandes de la grande distribution.

Ces verrous peuvent être levés moyennant la **valorisation de certaines caractéristiques des produits obtenues spécifiquement dans les systèmes diversifiés** (par exemple des qualités organoleptiques ou nutritionnelles particulières, ou le fait d'être obtenus sans recours aux pesticides) dans des **filières locales et/ou s'appuyant sur une labélisation**, permettant un prix de vente de la production plus élevé. La **distribution en circuit court** est également un moyen, notamment en maraîchage, de valoriser les productions issues de systèmes diversifiés auprès des consommateurs sensibles à la diversité des produits proposés, à leur saisonnalité, à la proximité de la zone de production (en plus des critères environnementaux et qualitatifs signalés précédemment). La réémergence, depuis le début des années 90, de mobilisations collectives autour de la consommation engagée constitue en ce sens une opportunité de valorisation des produits issus de systèmes optant pour des stratégies de protection des cultures reposant sur la diversification végétale plutôt que sur la lutte chimique. La vente directe et les circuits courts (qu'ils soient individuels⁷³ ou collectifs⁷⁴) ont ainsi connu un essor important. Ces formes de commercialisation vont de la vente à la ferme aux AMAP (Associations de Maintien de l'Agriculture Paysanne), dans lesquelles le consommateur paie à l'avance et s'engage sur une période donnée auprès du producteur. Les AMAP permettent une solidarité dans le transfert d'une partie du risque de production au consommateur. La littérature (méta-analyses) montre que les consommateurs ayant un intérêt pour les produits avec labels environnementaux présentent un consentement à payer d'en moyenne 30 % supérieur aux produits standards, et que les consommateurs ont également un consentement à payer positif pour des produits locaux.

L'absence de débouché peut aussi être contournée par une **transition vers un modèle économique dans lequel l'agriculteur transforme sa production à la ferme** (farine, pain, pâtes), modèle pouvant toutefois impliquer une charge de travail plus élevée. Pour les espèces nécessitant une transformation plus complexe, l'**existence d'un projet industriel sur le territoire** peut jouer un rôle de levier. Par exemple, le lancement d'une réflexion par des agriculteurs et des chercheurs au sujet de l'introduction de la cameline dans les systèmes de culture céréalières Isariens a été favorisé par l'existence d'un partenaire industriel potentiel motivé pour créer une bioraffinerie oléagineuse sur le territoire (Leclère, 2019).

⁷³ Marchés de plein vent, commerce de détail

⁷⁴ Collectif de consommateurs qui contractent avec un producteur, plateforme mettant en relation les consommateurs et les producteurs locaux type « La Ruche Qui Dit Oui »

Dans le cas de la diversification végétale reposant sur l'**introduction d'éléments semi-naturels** au sein de l'exploitation, l'enjeu est de pouvoir vendre le bois produit par les haies ou les rangées d'arbres des systèmes agroforestiers. Outre la création de filières de valorisation si elles n'existent pas, il est alors nécessaire que les agriculteurs apprennent à s'y insérer, avec l'accompagnement technique nécessaire.

Déployer la diversification végétale nécessite une coordination territoriale

Enfin, une coordination territoriale est nécessaire pour déployer la diversification végétale, que ce soit pour mettre en œuvre les modalités de **diversification à l'échelle du paysage** (organisation spatiale des cultures, gestion de la végétation semi-naturelle), ou pour garantir la **durabilité de certaines modalités de diversification déployées à une échelle parcellaire**. Par exemple, le déploiement généralisé dans un territoire d'une variété cultivée porteuse d'un gène de résistance contre un bioagresseur peut induire une pression sélective sur l'évolution génétique des populations de ce bioagresseur et sélectionner les variants capables de contourner la résistance, rendant la variété inefficace pour protéger la culture après un certain temps. Conserver la **durabilité des résistances variétales** nécessite donc de penser leur déploiement à l'échelle paysagère.

Des **solutions à l'échelle territoriale** mobilisant une diversité d'acteurs (agriculteurs, conseillers agricoles, industriels agroalimentaires, coopératives, gestionnaires de l'eau, associations et porteurs d'enjeu non agricoles, etc.) autour de projets de diversification végétale émergent de plus en plus, mais restent rares. La littérature met en évidence des difficultés méthodologiques à étudier et gérer le territoire, de par la multiplicité des échelles spatiales et temporelles à considérer et la diversité des acteurs impliqués. Le déploiement de la diversification végétale à l'échelle territoriale se heurte ainsi au cercle vicieux de besoin de preuve de concept pour implémenter cette gestion territoriale, et de besoin d'implémenter des stratégies collectives à l'échelle des territoires pour avoir des preuves de concept. 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 favorisant les solutions territoriales ressortent de la littérature : (i) le fait que l'action collective génère un gain collectif, pouvant correspondre par exemple à une éco-certification ou des paiements pour services environnementaux, (ii) la mise en place d'organisations collectives pour gérer les territoires agricoles, *via* par exemple des mécanismes de gouvernance polycentrique (par exemple, des réseaux d'acteurs mobilisant des systèmes de communication et d'information partagés ou des institutions collectives locales comme des coopératives) ou une planification et des incitations centralisées par l'État, (iii) la certification des produits, fermes et paysages, et les débouchés commerciaux comme par exemple des marchés de restauration collective.

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

Les politiques publiques ont été un levier fort pour initier et accompagner la modernisation de l'agriculture depuis l'après-guerre, avec pour conséquence une position actuellement dominante (emprise spatiale) de l'agriculture conventionnelle et une diminution de la diversité végétale des parcelles et des paysages agricoles. Le système conventionnel étant très stable du fait des nombreux verrous opérants aux différents niveaux d'organisation socio-économiques des filières et des territoires, la littérature scientifique souligne le rôle clef que peuvent jouer les politiques publiques pour réorienter les systèmes de production vers plus de diversification. Une transition de grande ampleur demande cependant des politiques publiques ambitieuses et qui se donnent les moyens de lever ces verrous systémiques. De plus, le contexte juridique, qui n'est pas toujours en cohérence avec les incitations fournies par les politiques publiques, peut également jouer en défaveur de la diversification végétale, ceci concernant essentiellement les modalités d'implantation et de gestion des éléments semi-naturels.

Des politiques ambitieuses pour sortir des verrouillages systémiques de l'agriculture conventionnelle

Si la Politique agricole commune (PAC) a progressivement introduit dans ses programmations successives des mesures visant à réduire les impacts environnementaux et sanitaires de l'agriculture conventionnelle (notamment *via* les mesures agro-environnementales du 2^e pilier introduites dès 1992, la conditionnalité des aides à partir de 2003, et le verdissement de sa programmation en 2014-2020 – voir Annexe 1), les bilans réalisés à l'échelle de certains États membres et de la France convergent sur le fait que les effets réels restent décevants. Ainsi, si le verdissement a eu une portée symbolique en inscrivant de manière plus forte le contrat liant agriculteurs et société, et en liant explicitement une partie des aides directes à des conditions environnementales, le résultat effectif sur l'environnement et la biodiversité des espaces agricoles a été peu visible (Cour des comptes européennes, 2017 ; 2020). Ce constat est largement expliqué par le détricotage de l'ambition initiale de la PAC de 2014 par les États membres et le Parlement européen, sous la pression des groupes d'intérêt et la peur de perdre en compétitivité. Les articles de Pe'er *et al.* (2019) et Pe'er et Lakner (2020), par exemple, construisent une revue des travaux scientifiques et des avis d'experts mettant en évidence le manque d'ambition environnementale de la PAC.

Le développement de certaines modalités de diversification ne sera possible qu'en s'appuyant sur des politiques publiques. Le cas de l'introduction d'élément semi-naturels en est un exemple emblématique. Les dispositifs de la PAC ont pendant longtemps incité directement ou indirectement les agriculteurs à étendre leur surface agricole utile aux dépens des éléments semi-naturels de bords de champ et des arbres et bosquets dans les parcelles, dont l'emprise foncière et l'entretien étaient perçus comme un frein à la modernisation et à l'augmentation de la productivité agricole. Les systèmes agroforestiers ont également été exclus des aides PAC jusqu'en 2001. A partir du début des années 2000, cependant, les politiques environnementales et agricoles, en particulier européennes (PAC, directive « nitrates », directives « habitats » et « oiseaux », etc.), ont cherché à favoriser leur conservation, puis leur restauration. Les éléments semi-naturels sont ainsi actuellement au cœur d'un nombre important de dispositifs de soutiens publics (BCAE ⁷⁵, paiement vert, MAEC ⁷⁶, aides aux investissements non productifs, et écorégimes à partir de 2023).

Les mesures adoptées dans la programmation 2014-2020 (paiement vert, MAEC ciblant l'implantation ou l'entretien d'éléments semi-naturels) se concentraient sur le maintien des éléments semi-naturels existants pour éviter leur destruction ou leur dégradation. Si elles apparaissent de ce point de vue relativement efficaces, elles s'avèrent insuffisamment ambitieuses pour favoriser l'implantation de nouveaux éléments semi-naturels au sein des exploitations ou des paysages ainsi que le développement de l'agroforesterie (Annexe 1). D'une part, l'absence de définition claire de ces éléments dans la PAC a favorisé les stratégies de contournement par certains États-membres ayant opté pour des pratiques agricoles moins contraignantes, permettant aux agriculteurs de respecter les seuils imposés en ne procédant qu'à peu (voire pas) de modifications. D'autre part, les mesures vraiment protectrices sont essentiellement mises en œuvre dans des zones protégées au plan écologique, là où ces éléments sont déjà présents en nombre, laissant de côté les territoires « ordinaires ». En complément des aides européennes, certains dispositifs français permettent le financement de la plantation de haies et d'alignements d'arbres intra-parcellaires (agroforesterie) : le plan « France Relance » à l'échelle nationale, des programmes financiers à l'initiative des collectivités locales (régions) ainsi que l'instauration localisée et expérimentale de paiements pour services environnementaux (notamment la rémunération de la séquestration du carbone dans les sols). Outre l'absence d'évaluation de l'impact de ces dispositifs, l'éparpillement des aides entre des mesures multiples apparaît insuffisamment incitatif. Les aides, pour servir de véritable moteur, ne sont pas à un niveau tel qu'elles peuvent compenser la complexité de la mise en œuvre de certaines pratiques, comme l'agroforesterie ou la gestion des prairies. La PAC de 2023 inclut désormais les mesures de verdissement dans la conditionnalité dite « renforcée », instaurant ainsi un effet cliquet de « non-retour en arrière ». En laissant aux États-membres une certaine liberté sur la conception de leurs écorégimes, elle n'impose toutefois pas de conditions spécifiques fortes sur l'amélioration de la présence de végétation semi-naturelle dans les milieux agricoles. Le PSN français se distingue cependant en instaurant une voie d'accès à l'écorégime dédiée aux infrastructures agro-écologiques (qui incluent des éléments semi-naturels) et un bonus « haie » censé encourager la protection et l'implantation de haies nouvelles sur le territoire agricole. Reste à voir si cette voie

⁷⁵ Bonnes conditions agricoles et environnementales

⁷⁶ Mesures agro-environnementales et climatiques

sera suivie par les exploitants et quel impact net elle aura sur la surface en éléments semi-naturels, notamment dans les territoires « ordinaires » ou qui en sont fortement dénués.

Pour d'autres modalités de diversification, qui présentent un intérêt économique à court terme actuellement insuffisant à lui seul pour lever les verrous d'adoption dans les filières, la littérature identifie plusieurs leviers de politiques publiques pour soutenir directement ou indirectement le recours à la diversification plutôt qu'aux pesticides pour protéger les cultures :

- Un **soutien direct** a pour objectif d'**accompagner l'adoption de pratiques de diversification** par des subventions, transférant ainsi vers le contribuable (national et européen) le fardeau économique que représente la prise en charge de la question environnementale par les agriculteurs. Les politiques publiques peuvent également **soutenir directement les filières en ciblant le conseil, la recherche, l'aide à l'investissement et la mise en place de débouchés** (notamment pour le développement des cultures mineures, tel que le Plan protéines végétales⁷⁷). Ce soutien peut être ciblé de manière à inciter l'innovation et sa diffusion, par exemple en favorisant l'émergence d'une pratique / culture de niche, en protégeant son développement et en accompagnant son adoption⁷⁸. Il peut également être adossé à la rémunération de services environnementaux, du fait des nombreux effets bénéfiques 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** passerait 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. La taxation offre des alternatives intéressantes à la réglementation et aux interdictions d'usage. Ce type de taxation environnementale est très plébiscité par les économistes de l'environnement (voir Berendse, 2017 et Finger *et al.*, 2017 pour des discussions récentes), car il s'agit d'un outil efficace, sur un plan théorique, qui déclenche à la fois une réduction des usages (en commençant par les moins rentables) et des mécanismes de substitution, c'est-à-dire le recours à des stratégies de protection des cultures alternatives, dont la diversification végétale fait partie. La taxation environnementale génère également des revenus, qui peuvent être utilisés pour accompagner le changement vers des pratiques plus vertueuses, par exemple. Il faut cependant noter que la mise en œuvre de tels outils désincitatifs est rendue difficile du fait de l'influence des lobbies (Swinnen *et al.*, 2015 ; Ansaloni, 2015), et de la faible acceptabilité de la taxation en général et des taxations environnementales en particulier. Compte-tenu de la faible élasticité de la demande par rapport au prix des pesticides, il faut en effet une taxation forte (ou progressant rapidement dans le temps) pour produire un effet. Ces taxes sont généralement perçues par la population comme coercitives et moins efficaces que des incitations positives (subventions) pour conduire à des changements de comportement⁷⁹. La taxation environnementale des pesticides reste pourtant un outil potentiellement très puissant pour amorcer la transition agroécologique. Sa mise en œuvre nécessiterait une analyse des déterminants de l'acceptabilité sociale de telles politiques. La pré-affectation des revenus de taxes à des programmes plébiscités par les agriculteurs peut être une solution.

Quoiqu'il en soit, l'étude des instruments de politique publique permettant d'accompagner et d'accélérer la transition agroécologique est un front de recherche appelé à se développer. Le Plan stratégique national (PSN) déclinant la future PAC à l'échelle française⁸⁰ vise « l'atteinte d'une **mosaïque de cultures présentes tout au long de l'année à l'échelle des paysages, à fort potentiel de préservation des sols et de la biodiversité, et permettant de réduire en même temps la taille des parcelles** là où elles ont pu s'agrandir, notamment en lien avec l'encouragement à **recréer des infrastructures agro-écologiques, en particulier les haies** via le bonus de l'écorégime cumulable avec la voie des pratiques. » (PSN, p.99). On note ainsi que les objectifs du PSN incluent des dimensions relatives à la diversification végétale à différentes échelles, notamment en renforçant l'éco-

⁷⁷ <https://agriculture.gouv.fr/batir-notre-souverainete-alimentaire-en-proteines-vegetales-0>

⁷⁸ Voir par exemple les recommandations issues du projet DiverIMPACT <https://zenodo.org/record/6382721#.Y0Z3NkzP2UJ>

⁷⁹ Ce phénomène a été observé pour d'autres enjeux, le plus connu étant celui de la taxe carbone et de son effet sur le prix des carburants, qui ont conduit à leur rejet dans de nombreux pays (voir la revue de Maestre-Andrés *et al.*, 2019).

⁸⁰ <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/131861>

conditionnalité des aides du premier pilier et en instaurant des conditions de diversification dans l'écorégime (diversification des assolements et amélioration des taux d'éléments semi-naturels dans le paysage – Annexe 1).

Il est encore trop tôt pour évaluer l'impact que pourrait avoir la future PAC 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 aient du mal à émerger d'elles-mêmes, et que des objectifs ambitieux (tels que la réduction de 50 % de l'usage des pesticides d'ici 2030 que la Commission Européenne propose d'inscrire dans le futur règlement sur l'usage de ces substances) ne soient pas atteints (Guyomard *et al.*, 2020). Un collectif de plus de 300 experts scientifiques issus de 23 Etats-membres de l'UE a d'ailleurs proposé, pour construire la future PAC en faveur de la biodiversité, de rehausser les exigences des conditionnalités et des écorégimes, et de privilégier si possible des MAEC à engagement de résultats et non de moyens pour améliorer leur efficacité et éviter les effets d'aubaine (Pe'er *et al.*, 2022). Ces experts soulignent également qu'une attention doit être portée à la cohérence des dispositifs, par exemple en permettant un cumul des paiements issus de l'écorégime et des MAEC dans le cas où ils favorisent des actions complémentaires sur la même zone en faveur de la biodiversité. En France, l'avis rendu par l'Autorité Environnementale⁸¹ sur la première version du PSN soumis en décembre 2021 souligne un niveau d'ambition environnementale insuffisant pour placer la France sur la trajectoire qui lui permettrait d'atteindre les objectifs qu'elle s'est fixés dans la stratégie bas carbone, le plan biodiversité ou la directive cadre sur l'eau. Après avoir également reçu un avis critique de la Commission européenne, la version légèrement remaniée du PSN français a finalement reçu l'approbation de la Commission européenne en août 2022.

Par ailleurs, outre des politiques agricoles ambitieuses, une transition généralisée des modes de production agricole en faveur de systèmes agroécologiques nécessite des politiques alimentaires volontaristes pour se faire rencontrer une offre de produits agricoles plus respectueux de l'environnement et des régimes alimentaires plus sains et durables. Ces politiques ne peuvent être conçues indépendamment les unes des autres (Guyomard *et al.*, 2020), que ce soit à l'échelle européenne ou nationale.

Comme on l'a vu précédemment, l'une des solutions permettant aux systèmes diversifiés d'être rentables est de valoriser les qualités particulières des produits (sanitaires, environnementales, etc.) dans des marchés de niche et/ou *via* une forme de labellisation. Bien que la littérature ne le renseigne pas de façon détaillée, de telles stratégies peuvent s'accompagner d'une hausse du prix de vente des produits alimentaires. Or, si la littérature montre que les consommateurs sont prêts à payer davantage pour des produits plus respectueux de l'environnement, elle montre également que des contraintes budgétaires (accentuées par des crises telles que la crise sanitaire et la guerre en Ukraine) les poussent à réagir à une inflation en se tournant vers des produits moins chers, possiblement de moindre qualité (nutritionnelle et environnementale). Une telle réaction peut, d'une part, conduire à des changements plus ou moins profonds des habitudes alimentaires (pas nécessairement en faveur d'une alimentation plus équilibrée et saine⁸²), et, d'autre part, dissuader (ne pas encourager) les agriculteurs d'adopter des pratiques plus respectueuses de l'environnement telles que les pratiques de diversification végétale.

A cela s'ajoute le constat que les régimes alimentaires des français, caractérisés par une diète en moyenne relativement riche en produits animaux et pauvre en produits végétaux (notamment fruits et légumes, et légumineuses) ne sont pas favorables à la santé (au sens de recommandations telles que celles de l'Organisation mondiale de la santé – Voir Tibi *et al.*, 2020). Or il est désormais admis que pour la plupart des consommateurs, les changements alimentaires n'auront pas lieu sans incitation politique. De plus, tout régime alimentaire favorable à la santé n'est pas nécessairement plus vertueux sur le plan environnemental, et inversement (voir par exemple Vieux *et al.*, 2018 ; 2020).

Si la question de l'articulation des politiques agricoles et alimentaires est posée depuis de nombreuses années, leur conception manque encore de cohérence (Galli *et al.*, 2020 ; Recanati *et al.*, 2019). La Commission européenne a cependant lancé une initiative visant à assurer la durabilité du système alimentaire de l'Union en

⁸¹ http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/211022_psn_pac_delibere_cle08263b.pdf

⁸² Des études récentes documentent le lien entre préoccupation environnementale des consommateurs et structure du régime alimentaire : les consommateurs de produits AB achètent de plus grandes quantités de fruits et légumes, de légumineuses, de produits à grains entiers, de protéines végétales et de plus faibles quantités de viande et de boissons alcoolisées et sucrées (Baudry *et al.*, 2017).

l'intégrant dans toutes les politiques liées aux denrées alimentaires⁸³. La Stratégie « Farm to Fork » du Green Deal est aussi un pas important fait dans cette direction. En France, la loi « Egalim » du 30 octobre 2018⁸⁴ affiche entre autres la volonté de renforcer la qualité sanitaire et environnementale des produits et de favoriser une alimentation saine, sûre et durable pour tous, et crée une certaine connexion entre modes de consommation et modes de production. Par exemple, la loi oblige la restauration collective publique à proposer dès le 1^{er} janvier 2022 des repas comprenant au moins 50 % de produits « durables » ou sous label de qualité avec un minimum de 20 % en agriculture biologique.

Des outils juridiques peu favorables à la diversification de la végétation semi-naturelle

Si les lois françaises de la fin du XX^e siècle cherchaient surtout à préserver l'environnement et la biodiversité des activités agricoles devenues trop intensives (posture défensive), leur tonalité a évolué plus récemment vers une volonté de promouvoir la diversité au cœur même de la production agricole. L'un des premiers enjeux étant de réduire l'utilisation des pesticides de synthèse, le plan Ecophyto⁸⁵ de réduction des usages de pesticides (dont la première mouture date de 2008) est l'une des principales stratégies mises en place par la France.

La loi « d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt » du 13 octobre 2014⁸⁶ marque un virage politique en vantant pour la première fois un autre modèle productif dit « agro-écologique », caractérisé par une triple performance économique, sociale et environnementale. Le législateur souhaite mettre en avant les modes de production innovants s'appuyant sur les services écosystémiques, et les démarches collectives conduites à l'échelle territoriale et pluriannuelle (par exemple des opérations de reboisement). Si les ambitions sont fortes, les moyens techniques mis en place (parmi lesquels l'ouverture du bail rural aux obligations environnementales et la création des groupements d'intérêts économiques et écologiques (GIEE) pour incarner les initiatives agro-écologiques) restent cependant minimalistes, purement volontaires et sectoriels. Leurs impacts réels sur les changements de pratiques agricoles restent difficilement mesurables.

La loi « Climat et résilience » du 22 août 2021⁸⁷ réaffirme l'importance de la diversification végétale avec l'objectif de porter la surface française cultivée en légumineuses à 8 % de la surface agricole utilisée d'ici le 1^{er} janvier 2030, l'impératif de préservation et d'implantation des haies et alignements d'arbres, et le maintien et le développement des surfaces agricoles en prairies permanentes. Point remarquable, la loi énonce un principe de compatibilité de la déclinaison française de la nouvelle Politique agricole commune (PSN) avec plusieurs feuilles de route nationales (la stratégie nationale bas-carbone, la stratégie nationale pour la biodiversité, la stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée et le plan national de prévention des risques pour la santé). Pour la première fois, les mesures nationales de versement des aides de la Politique agricole commune devraient donc être alignées sur le respect des objectifs environnementaux nationaux.

Cependant, concernant le déploiement des éléments semi-naturels, beaucoup d'obstacles relèvent d'une réglementation inadaptée ou qui tient insuffisamment compte de leur importance. Ces éléments implantés dans le paysage, la plupart du temps sur des espaces privés, se heurtent à un droit foncier rural rigide. Dans sa conception, le statut du fermage organisant les relations bailleurs-preneurs, et qui s'applique sur 70 % de la surface agricole utile française, tend par défaut à admettre, au nom de la liberté d'exploiter du fermier, la destruction des haies, rigoles et arbres qui séparent des parcelles attenantes, tout en dissuadant les opérations de plantations.

L'implantation des éléments semi-naturels en bord de champs est également susceptible de générer des problèmes de voisinage récurrents en milieu rural. De plus, le Code civil (qui régit les relations de voisinage) contraint l'implantation d'éléments semi-naturels en retrait de la limite qui divise les propriétés, induisant une emprise plus importante de ces éléments sur la surface dédiée à la culture de rente. Enfin, la réglementation des boisements des conseils départementaux peut également interdire des plantations dans certaines zones.

⁸³ https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13174-Sustainable-EU-food-system-new-initiative_en

⁸⁴ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000037547946>

⁸⁵ <https://agriculture.gouv.fr/ecophyto>

⁸⁶ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000029573022>

⁸⁷ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>

On observe également des approches imparfaites de certains éléments semi-naturels dans la législation. Les prairies permanentes, par exemple, ne sont définies que par leur durée, sans prise en compte de leurs qualités intrinsèques et des modes de gestion qui leur sont applicables. Ce critère unique peut avoir comme effet pervers d'amener les agriculteurs à supprimer une surface enherbée avant qu'elle ne bascule dans la catégorie des prairies permanentes.

Notons que l'**agroforesterie** pose des difficultés en étant un objet juridique mal identifié, car elle combine un mode de production agricole à une activité classée non-agricole (l'exploitation forestière), deux activités relevant de régimes juridiques distincts. L'emprise foncière des arbres peut aussi réduire la surface cultivable, et donc le montant des aides perçues par les agriculteurs pour leurs espaces productifs. De plus, la plupart des sociétés à objet agricole (GAEC, EARL, GFA) sont incompatibles avec l'exercice d'une activité forestière. La création d'un véritable cadre normatif pour l'agroforesterie serait de nature à lever ces freins.

Enfin des outils épars existent pour protéger les éléments semi-naturels. Ainsi du bail rural qui, si les parties en conviennent, peut inclure une clause qui préserve un taux minimal d'infrastructures agroécologiques (IAE), ou encore les obligations réelles environnementales (ORE), qui sont des engagements volontaires des propriétaires en faveur de la protection de la biodiversité sur leurs terres. Les documents d'urbanisme (comme le plan local d'urbanisme) contiennent aussi des mesures de classement des éléments semi-naturels qui empêchent d'y porter atteinte. Pour autant, aucune étude quantitative, ni recensement, n'existe pour mesurer le déploiement effectif de ce type de dispositif, ni son efficacité réelle.

En croisant l'ensemble des connaissances synthétisées dans l'ESCo, 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 adaptées au mélange, débouchés de la production) 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 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'au niveau des filières (manque de sélection variétale, de conseil et de recherche pour les cultures mineures, débouchés limités).
- Les **associations de cultures** de rente soulèvent des défis techniques (pour le semis, la récolte et le 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 telluriques).
- A l'autre bout du gradient, on trouve les **systèmes agroforestiers** (principalement évalués en contextes tropicaux), qui 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 la 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.

Encadré 2-3. La diversification végétale pour la protection des cultures ultra-marines

Le périmètre de l'ESCO inclut l'ensemble des territoires français, y compris ceux situés outre-mer. Les territoires ultra-marins présentent des spécificités historiques, biogéographiques, sociales, économiques et politiques susceptibles de conditionner le déploiement de stratégies de protection des cultures reposant sur la diversification végétale de façon différente de ce qui est observé en France métropolitaine. Du fait des compétences expertes rassemblées dans l'ESCO, l'accent a été mis ici sur les cinq départements et régions d'Outremer (DROM) français, tous situés en milieu tropical : la Guadeloupe, la Guyane, la Martinique, Mayotte et La Réunion. Si chacun d'entre eux présente sa propre trajectoire socio-économique, les DROM partagent un certain nombre de caractéristiques sociogéographiques : éloignement/isolement, étroitesse du territoire et insularité (à l'exception de la Guyane). Mais ces mêmes caractéristiques géographiques induisent des contraintes considérées comme des obstacles à leur croissance et à leur développement : dépendance politique, économique et sectorielle vis-à-vis de l'extérieur (principalement de la métropole), insertion limitée dans les espaces économiques de proximité, petite taille de marché, difficultés d'accès, faible diversification économique et exposition aux aléas naturels (cyclones, par exemple).

L'agriculture des DROM se caractérise sur le plan économique, par une dépendance à des débouchés extérieurs à ces territoires mais une faible compétitivité sur des marchés de plus en plus globalisés. Dans les DROM dits historiques (Guadeloupe, Martinique et Réunion), comme en métropole, le paysage agricole est dominé par des cultures de rente conduites selon des modes de production conventionnels (plus de 40 % de la surface agricole utilisée (SAU) est occupée par ces cultures de plantation, principalement la canne à sucre – Agreste, 2021). Ces systèmes sont développés dans une optique d'exploitation d'économies, même si leur contribution à la création de richesse profitable aux économies des DROM est de plus en plus discutée.

En parallèle des exploitations conventionnelles, il existe une variété de systèmes de production diversifiés dont certains, ultra-diversifiés, se fondent sur le respect de principes agroécologiques et relèvent pour partie de pratiques vernaculaires. Les **systèmes diversifiés** des DROM sont pour beaucoup des exploitations familiales en polyculture basée sur les cultures fruitières et maraîchères qui représentent 70% des exploitations des DROM (mais seulement 5,6 % à 29,6 % de la SAU selon les DROM – Agreste, 2021). Les associations d'espèces y sont fréquentes, principalement l'agroforesterie. La taille des parcelles y est réduite pour permettre une gestion familiale. Les haies sont soutenues par des mesures d'accompagnement des pouvoirs publics. Une partie de ces exploitations s'oriente vers l'agriculture biologique (e.g., à la Réunion, le nombre d'exploitations en agriculture biologique a doublé entre 2011 et 2018 – Agreste, 2019), mobilisant directement la diversification végétale pour la régulation des bioagresseurs. L'espace agricole et péri-urbain compte également les jardins créoles, qui sont un **système traditionnel ultra-diversifié** de polyculture poly-élevage de subsistance. On observe également un élargissement de ce type de système ultra-diversifié avec le développement de la permaculture et des jardins en ville.

Les DROM offrent ainsi localement des paysages agricoles d'une diversité végétale peu égalée. Les différentes modalités de diversification considérées dans l'ESCO sont mises en œuvre dans ces systèmes agricoles. Si les jardins créoles restent indemnes depuis toujours de toute utilisation de pesticides, il n'en est pas toujours de même dans les exploitations familiales où, par habitude ou par peur des risques, des pesticides sont encore souvent utilisés. Quelques travaux scientifiques illustrent cependant l'efficacité de la diversification végétale des systèmes en agriculture conventionnelle pour réguler les populations de bioagresseurs en milieu tropical (plantes pièges pour les mouches des légumes ou le foreur de la canne à La Réunion, couverts végétaux dans les vergers de manguiers à La Réunion, bordures de maïs pour la noctuelle de la tomate aux Antilles, etc.). Une comparaison des systèmes diversifiés et des systèmes monospécifiques des Antilles françaises (Guadeloupe, Martinique) montre que les premiers présentent une meilleure qualité biologique des sols et fournissent davantage de services écosystémiques, rejoignant les grandes tendances issues de la littérature mondiale. Enfin, les systèmes agricoles diversifiés permettent aux agriculteurs de répartir les risques de production, en particulier vis-à-vis des aléas naturels particulièrement récurrents et sévères dans ces territoires. Ils s'avèrent source de rendements et de revenus satisfaisants.

Toutefois, et de façon cohérente avec la littérature sur les conditions d'adoption des pratiques de diversification, des verrous technico-socio-économiques contraignent aujourd'hui fortement la diversification des systèmes dominants (plantations), la protection des systèmes diversifiés rencontrés dans les exploitations familiales et la sauvegarde des jardins créoles ultra-diversifiés. Nous retrouvons ici le défaut des **agroéquipements** adaptés à la diversification végétale. Les **références techniques et le conseil agricole** pour de nombreuses cultures de diversification endémiques (comme la patate douce) sont là aussi quasi inexistantes, bien qu'il existe une activité de recherche et transfert dynamique autour des systèmes de culture diversifiés en outre-mer. De façon originale, dans ces territoires par rapport à la métropole, les **connaissances** systémiques de production diversifiée existent ; ces connaissances sont toutefois portées par des individus en marge du système agricole dominant, avec une transmission interindividuelle et principalement orale.

En parallèle de ces verrous, le contexte général semble offrir des opportunités d'accentuer la diversification de l'agriculture des DROM. La **montée du consumérisme engagé** soutenant des méthodes de production respectueuses de l'environnement, **les demandes sociétales** de transparence sur les manières de produire, le **désengagement des institutions publiques en matière de protection tarifaire** des cultures de rente remettent fondamentalement en cause la robustesse des systèmes de production conventionnels. Ce constat ultra-marin rejoint celui qui concerne la métropole. Politiquement, des fenêtres d'opportunités de mise en lumière des systèmes alternatifs se dessinent tout en restant faibles. Elles se matérialisent à différents niveaux : international (e.g., Climate-Smart agriculture de la FAO 2010⁸⁸), supranational (e.g., paiements verts de la Politique agricole commune), national (e.g., la loi d'avenir en 2014). Elles prônent la reconnaissance des systèmes de culture diversifiés, voire ultra-diversifiés. Ces éléments de contexte, en particulier de nature politique, créent une conjoncture favorable à la mise en visibilité de ces systèmes et plus généralement à l'évolution des modèles agricoles des économies ultramarines. Enfin, un levier à la diversification se dégage actuellement en termes de **débouchés**, avec les filières de produits joints suivant une logique de paniers, qui constituent une innovation par rapport au système dominant et qui permettent une économie de gamme.

Ainsi, de par leur structure historique et leur dynamique actuelle, les systèmes agricoles diversifiés des DROM ont un fort potentiel pour constituer un laboratoire à ciel ouvert permettant d'élaborer des systèmes agricoles viables où la diversité végétale favorise à la fois la régulation naturelle des bioagresseurs, la fourniture d'autres services écosystémiques et le maintien, voire l'augmentation, des rendements dans des territoires concentrant les risques (environnementaux, économiques, sanitaires, sociaux) liés aux changements globaux.

⁸⁸ http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/newsroom/docs/the-hague-conference-fao-paper.pdf

Partie 3. Perspectives et besoins de recherches

3.1. Perspectives : diversification végétale des systèmes de culture et enjeux environnementaux

3.1.1. Quelle place peut avoir la diversification végétale dans la transition vers une agriculture sans pesticides ?

L'ESCO n'avait pas pour mandat d'évaluer les possibles voies de réduction de l'usage des pesticides, objectif qui relève d'un exercice de prospective conduit par INRAE et contemporain de la présente analyse. Toutefois, les enseignements de l'ESCO permettent d'apporter des premiers éléments de réflexions sur la place des systèmes diversifiés dans une transition de grande ampleur de l'agriculture vers le « zéro pesticides ».

Les stratégies de protection des cultures basées sur les modalités de diversification étudiées dans cette ESCo s'accompagnent en général d'une diminution du recours aux pesticides (effet relevé dans les articles analysant les systèmes diversifiés) ou ont été mises en œuvre dans des systèmes à bas niveau d'intrants ou en agriculture biologique (systèmes où elles s'avèrent être le plus rentable). La littérature ne quantifie cependant que rarement la réduction de l'usage des pesticides permise par ces stratégies, et rien ne garantit que la diversification, même adoptée à large échelle, permette d'atteindre une cible « zéro pesticides » sans que ces stratégies ne soient couplées à des obligations réglementaires en la matière⁸⁹.

D'autres scénarios sont avancés dans la littérature ou dans les arènes politiques pour accompagner l'agriculture vers une sortie des pesticides. C'est par exemple le cas d'un développement massif de l'Agriculture biologique (AB). Le Pacte vert pour l'Europe affiche d'ailleurs comme objectif de consacrer à l'Agriculture biologique au moins 25 % des terres agricoles d'ici 2030. La certification AB prohibe l'usage de tout intrant chimique de synthèse, parmi lesquels les pesticides. En ce sens, elle permet donc d'assurer une effectivité en termes de réduction de l'usage des pesticides.

De fait, bien que l'AB puisse également mobiliser la diversité végétale pour réguler les bioagresseurs, la certification AB n'impose pas la diversification végétale comme levier principal de protection des cultures. Des pratiques agricoles de substitution peuvent en effet être employées, certaines d'entre elles questionnées sur le plan environnemental lorsqu'utilisées avec intensité (comme la pulvérisation de produits régulateurs des bioagresseurs tels que des pyréthrinés, des argiles, des huiles et du cuivre). Le fort développement de l'AB ces dernières années a pu s'accompagner dans certaines régions (par exemple en Espagne) d'une sorte d'intensification, avec la mise en œuvre de pratiques dont l'intérêt en termes de préservation de la biodiversité et de fourniture de services écosystémiques est questionnable (par exemple la conversion d'éléments semi-naturels en terres arables ou encore les cultures intensives sous serres chauffées). Ainsi, si en moyenne l'AB favorise la biodiversité en comparaison avec l'agriculture conventionnelle (voir la synthèse de Rosa-Schleich *et al.*, 2019), elle ne permet pas d'atteindre des niveaux de conservation de la biodiversité aussi hauts que ceux obtenus dans des paysages diversifiés (Tschardt *et al.*, 2021). Une plus grande diversité d'habitats sur les terres agricoles augmente la diversité des papillons dans les exploitations de ~50 %, ce qui n'est pas le cas du changement de pratiques agricoles en AB (Weibull *et al.*, 2000). L'augmentation de la longueur des haies par champ de 250 m fait passer la diversité des oiseaux d'une à 12 espèces, tandis que la conversion de l'agriculture conventionnelle à l'agriculture biologique n'a augmenté la richesse des espèces que de 50 % (Batary *et al.* 2010).

⁸⁹ Très peu de liens sont établis dans la littérature entre régulation naturelle des bioagresseurs dans les systèmes diversifiés et abandon des traitements, principalement du fait du manque d'étude socio-économiques sur la manière dont les agriculteurs prennent en compte les dynamiques agroécologiques dans leurs prises de décision de traitement.

Par ailleurs, l'AB est parfois décriée du fait de son moindre rendement (*yield gap*) par rapport à l'agriculture conventionnelle (Gabriel *et al.*, 2013)⁹⁰, alors que la revue de littérature réalisée dans l'ESCo montre que les systèmes diversifiés sont associés en moyenne à des gains de rendement.

Pour atteindre des objectifs ambitieux en matière de réduction de l'usage des pesticides sans pénaliser les rendements et tout en préservant la biodiversité et la fourniture de services écosystémiques, l'AB et la diversification végétale doivent donc être pensées comme deux outils certes différents dans leur nature (agroécologique pour la diversification et réglementaire pour l'AB), mais complémentaires et qui se renforcent mutuellement lorsqu'ils sont combinés. La diversification en AB est performante économiquement tout en permettant de bonnes performances écologiques. Le label AB étant connu et recherché des consommateurs, la certification AB peut être un moyen de valoriser des productions agroécologiques basées sur la diversification végétale. Augmenter la diversité végétale des systèmes en AB permet en contrepartie de réduire le *yield gap* entre AB et agriculture conventionnelle (Ponisio *et al.*, 2015).

3.1.2. La diversification végétale des systèmes agricoles face au défi du changement climatique

L'ESCo n'a pas étudié les relations entre diversification végétale des espaces agricoles et changement climatique. Les études agroécologiques du corpus analysé ne les traitent pas en tant que telles, mais cet aspect est souvent mentionné dans les éléments de discussion des articles récents ou dans les perspectives. Ce paragraphe a pour objectif d'apporter des informations scientifiques non exhaustives sur les effets de la diversification végétale vis-à-vis (i) de la résistance et de la résilience (capacité à s'adapter aux perturbations ou à revenir à un régime de routine) face aux événements climatiques ponctuels (par exemple une sécheresse estivale très marquée, un hiver rigoureux, une inondation, une tempête, un cyclone dans les DROM, etc.) et aux évolutions globales (comme l'augmentation des températures), (ii) de leur contribution à l'atténuation du changement climatique par leur niveau d'émissions de gaz à effet de serre, la séquestration du carbone et la régulation de l'eau. La synthèse de Rosa-Schleich *et al.* (2019) recense les 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 la séquestration 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 les éléments semi-naturels dans les paysages agricoles favorisent la stabilisation des rendements vis-à-vis des variations des conditions climatiques annuelles (Raseduzzaman et Jensen, 2017 ; Reiss et Drinkwater, 2018 ; Redhead *et al.*, 2020). Les éléments semi-naturels contribuent au maintien de la biodiversité dans les agroécosystèmes lors des événements climatiques défavorables (Dufлот *et al.*, 2022). La synthèse bibliographique indique un plus grand stockage de carbone par la plupart des modalités de diversification, en particulier pour l'agroforesterie, et à l'exception des couverts d'interculture du fait de leur destruction (Section 2.1.2). Ces informations scientifiques 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.

La littérature dédiée aux relations entre diversification végétale des espaces agricoles et changement climatique existe, une synthèse des connaissances est à engager pour les évaluer précisément. Enfin, il est à noter que l'utilisation de l'eau par les cultures diversifiées n'est pas renseignée ici, ce qui représente également une évaluation essentielle à mener.

⁹⁰ L'AB affiche une perte de rendement de l'ordre de 19 à 25 % par rapport au conventionnel selon Meemken et Qaim (2018). Cet écart est notamment lié à l'absence d'usage d'engrais minéraux (Knapp *et al.*, 2018).

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

La littérature scientifique (méta-analyses ou vastes suivis de diversification à des échelles nationales, voire européenne) fournit des préconisations quantitatives en termes de déploiement de certaines modalités de diversification végétale. Il faut noter que ces préconisations ne concernent que certaines des pratiques de diversification examinées dans l'ESCO, et qu'elles ne portent pas spécifiquement sur le déploiement de la diversification végétale *en vue de protéger les cultures*. Elles considèrent plus globalement (et indistinctement) les différents bénéfices présumés de la diversification : favoriser et préserver la biodiversité dans son ensemble, et fournir un ensemble de services écosystémiques aux agriculteurs (services sous-tendant la production agricole) et à la société. Les préconisations rapportées ci-après sont mises en regard des chiffres caractérisant le niveau de déploiement actuel de ces pratiques de diversification en France (valeurs présentées dans le chapitre 1) afin de donner une première appréciation de la distance séparant la situation actuelle du type de cibles à atteindre.

D'après Borg *et al.* (2018), **les mélanges de variétés doivent être composés de 4 à 5 variétés** pour réguler efficacement les maladies. A titre de comparaison, les mélanges variétaux de blé (qui représentent de l'ordre de 15 % de la sole nationale de blé) sont composés de 2 à 3 variétés maximum.

Corre-Hellou *et al.* (2014) indiquent que **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) sont souvent suffisantes pour réguler efficacement 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.

Bohan *et al.* (2011, 2021) préconisent des **rotations en grandes cultures de plus de 3 ans diversifiant les périodes de culture (cultures d'hiver et de printemps) et en insérant si possible des Brassicacées**, pour réguler notamment les adventices, et des légumineuses pour la fixation de l'azote. 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), et les monocultures occupaient 12 % de ces surfaces en 2006. De plus, le sol reste nu pendant la période d'interculture sur 14 % des surfaces de grandes cultures, cette valeur s'élevant à deux tiers pour le soja et un peu plus de la moitié pour le maïs grain.

Sur la base d'une vaste étude européenne comparant 435 paysages agricoles (portions de 1 km x 1 km) localisés dans sept régions européennes et une région nord-américaine, Sirami *et al.* (2019) concluent qu'une **taille moyenne de parcelle de grandes cultures d'environ 2.8 ha** est optimale pour favoriser la régulation et la biodiversité. Les auteurs estiment qu'une diminution de 5 ha à 2,8 ha augmente autant la biodiversité que lorsque la proportion de milieux semi-naturels passe de 0,5 % à 11 % dans le paysage. Cette préconisation est à comparer à la moyenne française de 3,1 ha (tous types d'assolements confondus), moyenne masquant cependant une large disparité. En effet, si près de 50 % des parcelles font moins de 2,1 ha, 50 % de la surface agricole utilisée est occupée par des parcelles de plus de 6,8 ha (Sirami et Midler, 2021⁹¹).

La littérature s'accorde à conclure que les **éléments semi-naturels doivent occuper environ 20 % de la surface des paysages** pour assurer les régulations d'arthropodes ravageurs (*via* le soutien des populations d'ennemis naturels), la conservation de la biodiversité en général et la fourniture de divers services écosystémiques (y compris la pollinisation des cultures) (Tschardt *et al.*, 2002 ; Thies *et al.*, 2005 ; Garibaldi *et al.*, 2021). En complément, une étude estime que les **linéaires de haies entourant les parcelles doivent atteindre 200 à 400 m par ha** pour concilier rendement et biodiversité (Martin *et al.*, 2019). On manque cependant de recensement systématique et actualisé des éléments semi-naturels, catégorie incluant une grande diversité d'éléments (voir Chapitre 1). Du fait du manque de statistiques nationales les concernant et de la grande variabilité des chiffres selon les sources, il est aujourd'hui difficile d'estimer la part qu'occupent les éléments semi-naturels dans les paysages agricoles français. Il est cependant clair que cette part varie très fortement d'une région à l'autre, certes très élevée dans les zones d'élevage extensif (du fait de la présence de prairies permanentes et autres surfaces toujours en herbe), mais souvent inférieure à 5 % dans les plaines céréalières. Si elle a été plus ou moins enrayée au fil des dernières décennies, la dynamique de diminution des éléments semi-naturels initiée après-guerre se poursuit encore pour certains d'entre eux, notamment pour les haies et alignements d'arbres qui

⁹¹ <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Ana163/detail/>

perdent en moyenne 7000 km par an. La restauration des haies fait d'ailleurs partie de l'un des objectifs du plan France Relance 2021-2022, qui avait pour objectif de restaurer 7 000 km de haies et d'alignements d'arbres intra-parcellaires sur cette même période.

Le développement de l'agroforesterie est un moyen de multiplier les alignements d'arbres intra-parcellaires. Bien qu'elle soit soutenue par un plan quinquennal lancé en 2015⁹², sa dynamique de développement en France reste toutefois difficile à estimer car les statistiques disponibles sont éparses et englobent souvent les haies (cf. Chapitre 1). L'étude conduite par l'Inra sur la contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Pellerin *et al.*, 2013) estimait que 3,9 Mha de cultures et 2 Mha de prairies seraient aptes à être complantées d'arbres en 2030⁹³. En faisant l'hypothèse d'une diffusion lente de ces pratiques (dont l'adoption suppose un changement profond du mode de production) sur seulement 4 à 10 % de cette assiette, les auteurs estimaient la possibilité d'atteindre **entre 230 000 ha et 590 000 ha d'agroforesterie intraparcellaire** en 2030, à comparer aux 100 000 à 170 000 ha estimés au milieu des années 2010. À noter que la dynamique de développement de ces systèmes était plutôt de 1 000 à 5 000 ha par an dans les années 2010 (CGAAER, 2015), permettant, si elle se maintenait, d'atteindre au mieux la fourchette basse estimée par Pellerin *et al.*, (2013) en 2030.

3.2. Besoins de recherche et de travaux complémentaires pour combler les lacunes identifiées dans l'ESCo

Améliorer la compréhension des mécanismes de régulation naturelle des bioagresseurs

La synthèse bibliographique dont les résultats sont présentés en section 2.1 met en évidence plusieurs lacunes de connaissances. Si la littérature biotechnique est globalement abondante sur les effets régulateurs de la diversité végétale, l'effort de recherche n'est pas équitablement réparti entre (i) les catégories de bioagresseurs et (ii) les modalités de diversification. Ainsi, les **insectes telluriques, les maladies vectorielles, les nématodes, les gastéropodes, les acariens et les plantes parasites** ne sont aujourd'hui pas suffisamment étudiés. Le potentiel offert par la diversité des **assolements** et celle des **éléments semi-naturels dans les paysages**, doit également être davantage exploré. Par ailleurs, les systèmes de grandes cultures sont beaucoup plus étudiés que les **cultures maraîchères**, limitant les connaissances disponibles pour concevoir le déploiement de la diversification végétale dans ces systèmes agricoles qui figurent aujourd'hui parmi les plus consommateurs de pesticides à l'hectare. Outre ces lacunes de connaissances relatives à des couples « modalité de diversification – catégorie de bioagresseurs », on manque de travaux pour estimer (i) les effets régulateurs de **combinaisons de modalités de diversification** (ii) pour réguler de **multiples bioagresseurs**. Anticiper ces effets nécessite de **renforcer la compréhension des mécanismes qui sous-tendent les régulations naturelles, car une partie n'est considérée dans les études scientifiques que de façon théorique, sans démonstration fonctionnelle**.

Comblent ces lacunes requiert de changer de paradigme pour étudier les effets de la diversité végétale. A la place d'une comparaison *ad hoc* de différents niveaux de simplification paysagère sur la régulation des bioagresseurs, il est en effet nécessaire d'évaluer explicitement des effets de la diversification par **des expériences à grande échelle de restauration de la diversité végétale paysagère**, autrement dit la conception d'**expérimentations à l'échelle de territoires agroécologiques**. De telles expérimentations permettraient d'appréhender la dépendance des régulations naturelles aux conditions locales, et d'intégrer des mesures de dégâts (au-delà des seules mesures de variation des populations de bioagresseurs). S'inscrivant dans le long terme, ces dispositifs sont également nécessaires pour évaluer la **durabilité des régulations**, ainsi que l'évolution de leur **efficacité face aux changements globaux** (changement climatique, érosion de la biodiversité). En effet, ces facteurs de changement affectent les aires de répartition des espèces de bioagresseurs et de leurs ennemis naturels et

⁹² Il est à noter que le rapport d'évaluation du plan rendu public en 2021 souligne que le plan, qui n'a pas fait l'objet d'un financement dédié ni proposé d'objectif chiffré sur le développement de l'agroforesterie à l'horizon 2020, constituait essentiellement « un plaidoyer en faveur de l'agroforesterie » ambitionnant surtout d'en maintenir les surfaces.

⁹³ Parcelles d'une taille supérieure à 4 ha (pour des questions de compatibilité avec la mécanisation du travail entre les rangées d'arbres) et présentant un sol suffisamment profond et apte à stocker de l'eau pour les plantes (soit 38 % des sols en cultures, 31 % en prairies).

agissent comme une pression de sélection faisant évoluer les espèces elles-mêmes (adaptation biologique correspondant à la modification des traits de vie). Une bonne articulation des effets « durabilité » et « efficacité » doit être recherchée dans l'intérêt collectif pour l'ensemble des modes de diversification végétale. Notons que le changement climatique influe également sur les aires de répartition des plantes (qu'elles soient cultivées ou non), constituant une contrainte supplémentaire dans le déploiement de la diversification végétale.

Améliorer la compréhension des organisations socio-économiques

En premier lieu, l'étude des déterminants précis des choix des agriculteurs en matière de protection des cultures, à l'échelle de l'exploitation ou de manière collective dans les territoires, doit être renforcée. La manière dont les agriculteurs (individuellement ou collectivement) **appréhendent les dynamiques agroécologiques** et l'évolution des populations de bioagresseurs n'est pas étudiée, ni le rôle que pourrait avoir une offre de conseil "agroécologique" sur cette connaissance. L'**articulation des pratiques de diversification avec les méthodes de biocontrôle**, notamment en période de transition des systèmes cultivés de l'agriculture conventionnelle à l'agroécologie est également à étudier. De tels travaux permettraient alors de mieux estimer les impacts de l'adoption des pratiques de diversification végétale sur la gestion de l'exploitation (notamment l'organisation et le temps de travail) et sur l'usage des pesticides. Il reste également à étudier les effets qu'auront les évolutions réglementaires récentes sur l'organisation des filières et le **développement de démarches alternatives de sélection variétale**. Le développement de débouchés pour les produits issus de systèmes diversifiés appelle quant à lui des recherches sur la **répartition de la valeur dans les filières** et sur les **comportements des consommateurs** vis-à-vis de modes de production particuliers et/ou des produits ne répondant pas aux standards conventionnels. L'étude des dynamiques de **diffusion des innovations** comme la diversification végétale reste également un front de science majeur, qui appelle des travaux sur le rôle des réseaux, l'économie comportementale et la diffusion de ces nouvelles pratiques dans les territoires.

En second lieu, l'évaluation de la performance économique des systèmes diversifiés se heurte au **manque de données obtenues en situation réelle sur les pratiques émergentes**. D'une part, les données classiquement disponibles captent insuffisamment les pratiques émergentes, et ne permettent pas leur analyse fine. D'autre part, estimer la performance économique des systèmes diversifiés nécessite de **réévaluer les notions de seuils de nuisibilité** (à partir duquel le dégât devient dommage), **de dommage et de rentabilité économique**. Ces notions sont actuellement définies en référence aux normes et standards associés aux systèmes conventionnels, et n'intègrent ni les externalités négatives des pesticides, ni celles, positives, des modalités de diversification végétale.

Là encore, les expérimentations large échelle décrites précédemment pourraient être un moyen de combler ces besoins de recherches à toutes les échelles d'organisation socio-économique. Elles seraient l'occasion d'articuler les travaux en écologie avec ceux des différentes disciplines étudiant le comportement et les déterminants des décisions des agriculteurs (économie, management, agronomie système, sociologie, ergonomie, etc.) afin d'étudier simultanément (i) le comportement des agriculteurs en réponse à la pression des bioagresseurs et (ii) les effets des pratiques qu'ils mettent en œuvre sur les populations de bioagresseurs, et biodiversité et la fourniture de services écosystémiques. Enfin, il faut instruire la question de la place de l'élevage dans les systèmes de culture diversifiés, en tant que levier pour la diversification végétale et débouché pour les productions végétales.

S'appuyer sur des dispositifs de recherche sur le long terme et mobiliser des outils numériques...

Certains dispositifs de recherches interdisciplinaires et/ou transdisciplinaires semblent propices à de telles recherches intégrées et territoriales, mais ils doivent être multipliés et pérennisés à l'échelle nationale et européenne. Les plateformes expérimentales INRAE et les zones ateliers (inter-instituts et inter-organismes) en milieu agricole sont adaptées aux études de long terme. Les démarches d'innovation participative comme les *living lab*⁹⁴ semblent répondre à l'approche systémique requise, et permettre la comparaison de larges gammes de systèmes diversifiés. Déployés dans divers pays, de tels dispositifs permettraient de réaliser une comparaison de systèmes diversifiés à l'échelle européenne. En complément, le suivi quantitatif et spatialisé de l'adoption

⁹⁴ Le *living lab* ou « laboratoire vivant » est une démarche d'innovation participative incluant l'utilisateur. Il vise à répondre à des problématiques complexes et multidisciplinaires à l'échelle d'un territoire.
<https://dicoagroecologie.fr/dictionnaire/living-lab/>

des pratiques de diversification peut s'appuyer sur la télédétection, avec toutefois des développements technologiques requis pour certaines modalités de diversification.

La modélisation représente une voie de recherche complémentaire à investir, pour (i) aider à l'optimisation de chaque mode de diversification (par exemple pour sa composition variétale et/ou spécifique et son arrangement spatial) quant à ses effets sur la régulation des bioagresseurs et la fourniture d'autres services écosystémiques et (ii) l'étude exploratoire du vaste champ des possibles des stratégies de combinaison des modes de diversification à larges échelles spatio-temporelles, y compris pour l'évaluation de la durabilité de ces systèmes de production, et des boucles de rétroactions à différents termes temporels entre la composante agroécologique et la composante socio-économique des paysages agricoles.

... pour concevoir des politiques publiques favorables à la diversification

La faible efficacité des politiques publiques pour promouvoir l'adoption de la diversification végétale ainsi que sa coordination spatiale dans les paysages agricoles requiert des travaux plus appliqués relatifs à **l'évaluation des mesures en place** (évaluation ex post) **ou envisagées** (évaluation ex ante). L'enjeu est en effet de mesurer l'effet causal des politiques, c'est-à-dire l'effet attribuable strictement à la mesure et non pas à d'autres déterminants. Cela nécessiterait une meilleure collaboration avec les décideurs publics et avec les responsables professionnels pour pouvoir établir des protocoles expérimentaux de type expérience sociale randomisée.

Les recherches doivent également porter sur la **conception des politiques publiques agricoles**. Ces travaux doivent intégrer une réflexion sur (i) la **mise en cohérence des politiques agricoles agissant à différents niveaux** (local, national, européen), et (ii) leur **mise en cohérence avec les autres politiques sectorielles** (par exemple agriculture, environnement ou biodiversité et alimentation) mais impliquant les mêmes acteurs / territoires. La cohérence entre outils de politiques publiques et outils réglementaires est également insuffisamment considérée.

En résumé, la diversification végétale des parcelles et des paysages agricoles :

- est un levier pour protéger les cultures ;
- favorise la biodiversité associée et les services écosystémiques rendus aux agriculteurs et à la société ;
- permet d'atteindre des rendements souvent supérieurs aux systèmes peu diversifiés ;
- a des effets contrastés sur la rentabilité économique de l'exploitation à court terme...
- ... et se heurte à des verrous au sein des filières agricoles et dans les territoires ;
- nécessite des politiques publiques ambitieuses pour un déploiement à large échelle.

Au-delà d'une transition vers des modes de production sans intrants de synthèse plus respectueux de l'environnement, l'évolution des systèmes agricoles doit répondre aux enjeux de la sécurité alimentaire : assurer une production alimentaire suffisante en quantité et en qualité pour la population humaine mondiale à l'avenir, un accès équitable à la nourriture, et l'autonomie alimentaire, dans des cadres complexes comme la transition alimentaire mondiale (place des produits animaux, entre autres) et la santé globale (*One health*). L'ESCO montre que la diversification végétale présente un fort potentiel pour contribuer à répondre à ces enjeux.

Références citées

- Actéon-Environnement., 2021. Rapport d'évaluation du plan de développement de l'agroforesterie 2015-2020, 167. <https://agriculture.gouv.fr/evaluation-du-plan-de-developpement-de-lagroforesterie-2015-2020>
- Agreste, 2021. L'agriculture, la forêt, la pêche et les industries agroalimentaires. GRAPH'AGRI 43ème édition Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, Service de la statistique et de la prospective. 224. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/GraFra2021Integral/detail/>
- Agreste-la-Réunion, 2019. Mémento 2019 agricole et rural. <http://sg-proxy02.maaf.ate.info/IMG/pdf/R97419C01.pdf>
- Alignier A.; Sole-Senan X.O.; Robleno I.; Baraibar B.; Fahrig L.; Giralt D.; Gross N.; Martin J.L.; Recasens J.; Sirami C.; Siriwardena G.; Baillod A.B.; Bertrand C.; Carrie R.; Hass A.; Henckel L.; Miguet P.; Badenhausser I.; Baudry J.; Bota G.; Bretagnolle V.; Brotons L.; Burel F.; Calatayud F.; Clough Y.; Georges R.; Gibon A.; Girard J.; Lindsay K.; Minano J.; Mitchell S.; Patry N.; Poulin B.; Tschardtke T.; Vialatte A.; Violle C.; Yaverscovski N.; Batary P., 2020. Configurational crop heterogeneity increases within-field plant diversity. *Journal of Applied Ecology*, 57 (4): 654-663. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13585>
- Ansaloni M., 2015. Le tournant environnemental de la PAC : Débats et coalitions en France, en Hongrie et au Royaume-Uni. Paris: L'Harmattan (Logiques politiques), 374 p.
- Arata L.; Sckokai P., 2016. The impact of agri-environmental schemes on farm performance in five E.U Member states: a DIS-matching approach. *Land Economics*, 92 (1): 167-186. <https://www.jstor.org/stable/24773471>
- Arvalis, 2021. Choisir et décider synthèse nationale 2020 : céréales à paille interventions de printemps. Paris, France: Arvalis. P 146, Choisir et Décider, 146.
- Baldi I.; Jérémie B.; Chevrier C.; Coumoul X.; Elbaz A.; Goujon S.; Jouzel J.-N.; Monnerneau A.; Multigner L.; Salles B.; Siroux V.; Spinosi J., 2021. Pesticides et effets sur la santé : Nouvelles données: Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM), Paris : Inserm : Éditions EDP Sciences (ISSN : 0990-7440) / XIX - 1009 p. <https://www.hal.inserm.fr/inserm-03384960>
- Bartual A.M.; Sutter L.; Bocci G.; Moonen A.C.; Cresswell J.; Entling M.; Giffard B.; Jacot K.; Jeanneret P.; Holland J.; Pfister S.; Pinter O.; Veromann E.; Winkler K.; Albrecht M., 2019. The potential of different semi-natural habitats to sustain pollinators and natural enemies in European agricultural landscapes. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 279: 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.04.009>
- Batary P.; Matthiesen T.; Tschardtke T., 2010. Landscape-moderated importance of hedges in conserving farmland bird diversity of organic vs. conventional croplands and grasslands. *Biological Conservation*, 143 (9): 2020-2027. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.05.005>
- Baudry J.; Alles B.; Peneau S.; Touvier M.; Mejean C.; Hercberg S.; Galan P.; Lairon D.; Kesse-Guyot E., 2017. Dietary intakes and diet quality according to levels of organic food consumption by French adults: cross-sectional findings from the NutriNet-Sante Cohort Study. *Public Health Nutrition*, 20 (4): 638-648. <https://doi.org/10.1017/s1368980016002718>
- Beillouin D.; Ben-Ari T.; Malezieux E.; Seufert V.; Makowski D., 2021. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*, 27 (19): 4697-4710. <https://doi.org/10.1111/gcb.15747>
- Berendse F., 2017. Add a tax to the EU agricultural policy. *Nature*, 543 (7645): 315-315. <https://doi.org/10.1038/543315a>
- Bertoni D.; Aletti G.; Ferrandi G.; Micheletti A.; Cavicchioli D.; Pretolani R., 2018. Farmland Use Transitions After the CAP Greening: a Preliminary Analysis Using Markov Chains Approach. *Land Use Policy*, 79: 789-800. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.012>
- Bodiguel L., 2009. Une conditionnalité en bonne santé ! A propos de la dernière réforme des aides de la PAC. *Revue de Droit Rural*, (378): 17-23. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01688514>
- Bohan D.A.; Powers S.J.; Champion G.; Houghton A.J.; Hawes C.; Squire G.; Cussans J.; Mertens S.K., 2011. Modelling rotations: can crop sequences explain arable weed seedbank abundance? *Weed Research*, 51 (4): 422-432. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2011.00860.x>
- Bohan D.A.; Schmucki R.; Abay A.T.; Termanen M.; Bane M.; Charalabidis A.; Cong R.G.; Derocles S.A.P.; Dorner Z.; Forster M.; Gibert C.; Harrower C.; Oudoire G.; Therond O.; Young J.; Zalai M.; Pocock M.J.O., 2021. Designing farmer-acceptable rotations that assure ecosystem service provision in the face of climate change. In: Bohan D.A.; Dumbrell A.J.; Vanbergen A.J., eds. *Future of Agricultural Landscapes*, Pt Iii. San Diego: Elsevier Academic Press Inc (Advances in Ecological Research), 169-244. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2021.01.002>
- Borg J.; Kiaer L.P.; Lecarpentier C.; Goldringer I.; Gauffreteau A.; Saint-Jean S.; Barot S.; Enjalbert J., 2018. Unfolding the potential of wheat cultivar mixtures: A meta-analysis perspective and identification of knowledge gaps. *Field Crops Research*, 221: 298-313. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.006>

- Butault J.-P.; Dedryver C.-A.; Gary C.; Guichard L.; Jacquet F.; Meynard J.M.; Nicot P.C.; Pitrat M.; Reau R.; Sauphanor B.; Savini I.; Volay T., 2010. Écophyto R&D : quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse du rapport de l'étude. Paris (France): INRA Editions Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer, (978-2-7380-1272-2), 90 p. <https://doi.org/10.15454/r7ae-b824>
- CCE, 2008. La conditionnalité est-elle une politique efficace ? Rapport spécial, 1-64. <https://doi.org/10.2865/35410>
- CCE, 2017. Rapport spécial n° 21/2017: Le verdissement: complexité accrue du régime d'aide au revenu et encore aucun bénéfice pour l'environnement, 59. <https://www.eca.europa.eu/fr/Pages/DocItem.aspx?did=44179>
- CCE, 2020. Rapport spécial 13/2020: Biodiversité des terres agricoles: la contribution de la PAC n'a pas permis d'enrayer le déclin, 62. <https://www.eca.europa.eu/fr/Pages/DocItem.aspx?did=53892>
- CGAAER, 2015. Promotion des systèmes agroforestiers. Propositions pour un plan d'actions en faveur de l'arbre et de la haie associés aux productions agricoles. Rapport n°14094, 79. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/71689>
- Chacon-Labela J.; Palacios P.G.; Matesanz S.; Schob C.; Milla R., 2019. Plant domestication disrupts biodiversity effects across major crop types. *Ecology Letters*, 22 (9): 1472-1482. <https://doi.org/10.1111/ele.13336>
- Colbach N.; Colas F.; Cordeau S.; Maillot T.; Queyrel W.; Villerd J.; Moreau, D., 2021. The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management. *Field Crops Research*, 261: 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006>
- Cordeau S.; Dessaint F.; Denieul C.; Bonin L.; Vuillemin F.; Delattre M.; Rodriguez A.; Guillemain J.-P.; Chauvel B., 2016. La nuisibilité directe des adventices en grandes cultures : quelles réponses nous apportent les essais désherbage ? AFPP – 23e conférence du COLUMA : Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. 2016, 12.
- Corre-Hellou G.; Baranger A.; Bedoussac L.; Cassagne N.; Canavacciolo M.; Fustec J.; Pelzer E.; Piva G., 2014. Interactions entre facteurs biotiques et fonctionnement des associations végétales. *Innovations Agronomiques*, 40: 25-42. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01173342>
- Desjeux Y.; Dupraz P.; Thomas A., 2011. Les biens publics en agriculture, une voie vers l'écologisation de la PAC. Colloque National Unité Ecodéveloppement. Ecologisation des politiques publiques et des pratiques agricoles. Avignon, 16 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01462639>
- Devaud N.G.F.; Barbu C.M., 2019. Quantification of bioaggressors induced yield gap for grain crops in France. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/641563>
- Dubois J.-J., 2016. L'évolution des systèmes agroforestiers en France. Leur rôle en agroécologie. Pollution atmosphérique (Numéro spécial "Agriculture et qualité de l'air entre villes et campagnes") : 177-190. https://www.appa.asso.fr/wp-content/uploads/2020/02/Dubois_2016.pdf
- Duflot R.; San-Cristobal M.; Andrieu E.; Choisis J.P.; Esquerre D.; Ladet S.; Ouin A.; Rivers-Moore J.; Sheeren D.; Sirami C.; Fauvel M.; Vialatte A., 2022. Farming intensity indirectly reduces crop yield through negative effects on agrobiodiversity and key ecological functions. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 326: 10. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107810>
- Dupraz C.; Talbot G.; Querné A.; Dufour L., 2010. What explanations for the surprising productivity of temperate agroforestry systems as measured by their Land Equivalent Ratio? *Agro2010*. Montpellier, 271-272. <http://www.fagro.edu.uy/fsd/agro2010/paper/s223/Dupraz.pdf>
- Finger R.; Mohring N.; Dalhaus T.; Bocker T., 2017. Revisiting Pesticide Taxation Schemes. *Ecological Economics*, 134: 263-266. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.12.001>
- Gabriel D.; Sait S.M.; Kunin W.E.; Benton T.G., 2013. Food production vs. biodiversity: comparing organic and conventional agriculture. *Journal of Applied Ecology*, 50 (2): 355-364. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12035>
- Galli F.; Prosperi P.; Favilli E.; D'Amico S.; Bartolini F.; Brunori G., 2020. How can policy processes remove barriers to sustainable food systems in Europe? Contributing to a policy framework for agri-food transitions. *Food Policy*, 96: 15. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101871>
- Garibaldi L.A.; Oddi F.J.; Miguez F.E.; Bartomeus I.; Orr M.C.; Jobbagy E.G.; Kremen C.; Schulte L.A.; Hughes A.C.; Bagnato C.; Abramson G.; Bridgewater P.; Carella D.G.; Diaz S.; Dicks L.V.; Ellis E.C.; Goldenberg M.; Huaylla C.A.; Kuperman M.; Locke H.; Mehrabi Z.; Santibanez F.; Zhu C.D., 2021. Working landscapes need at least 20% native habitat. *Conservation Letters*, 14 (2): 10. <https://doi.org/10.1111/conl.12773>
- Glaze-Corcoran S.; Hashemi M.; Sadeghpour A.; Jahanzad E.; Afshar R.K.; Liu X.B.; Herbert S.J., 2020. Understanding intercropping to improve agricultural resiliency and environmental sustainability. In: Sparks D.L., ed. *Advances in Agronomy*, Vol 162. London: Academic Press Ltd-Elsevier Science Ltd (Advances in Agronomy), 199-256. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.004>
- Guyomard H. (coord.); Bureau J.-C. (coord.); Chatellier V.; Detang-Dessendre C.; Dupraz P.; Jacquet F.; Reboud X.; Requillart V.; Soler L.-G.; Tysebaert M., 2020. The Green Deal and the CAP: policy implications to adapt farming practices and to

- preserve the EU's natural resources: AGRI committee of the European Parliament. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU\(2020\)629214](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU(2020)629214).
- Halliday F.W.; Rohr J.R., 2019. Measuring the shape of the biodiversity-disease relationship across systems reveals new findings and key gaps. *Nature Communications*, 10: 10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13049-w>
- Hossard L.; Philibert A.; Bertrand M.; Colnenne-David C.; Debaeke P.; Munier-Jolain N.; Jeuffroy M.H.; Richard G.; Makowski D., 2015. Effects of halving pesticide use on wheat production. *Scientific Reports*, 4 (1): 4405. <https://doi.org/10.1038/srep04405>
- Inra, 2017. Évaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESE. Résumé de l'étude réalisée par l'Inra. Inra (France), 12 p. <https://doi.org/10.15454/mjk0-xf31>
- Jouy L.; Wissocq A., 2011. Observatoire des pratiques : 34 types de successions culturales en France. *Perspectives Agricoles*. (379): 44-46. https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pi/a3/97/bd/ae/379_4227745313914533229.pdf
- Knapp S.; van der Heijden M.G.A., 2018. A global meta-analysis of yield stability in organic and conservation agriculture. *Nature Communications*, 9: 9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05956-1>
- Le Roux X. (coord.); Barbault R.; Baudry J.; Burel F.; Doussan I.; Garnier E.; Herzog F.; Lavorel S.; Lifran R.; Roger-Estrade J.; Sarthou J.-P.; Trommetter M., 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Synthèse du rapport d'expertise. Inra (France), 116 p. <https://doi.org/10.15454/chz5-0922>
- Leclère M., 2019. Introduire une espèce de diversification dans les systèmes de culture d'un territoire : articuler production de connaissances et conception dans des dispositifs multi-acteurs. Cas de la cameline dans l'Oise. École doctorale n°581 : agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES), Université Paris-Saclay - AgroParisTech, Palaiseau. 282 p. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03092837>
- Louhichi K.; Ciaian P.; Espinosa M.; Perni A.; Gomez y Paloma S., 2018. Economic impacts of CAP greening: application of an EU-wide individual farm model for CAP analysis (IFM-CAP). *European Review of Agricultural Economics*, 45 (2): 205–238. <https://doi.org/10.1093/erae/jbx029>
- Maestre-Andres S.; Drews S.; van den Bergh J., 2019. Perceived fairness and public acceptability of carbon pricing: a review of the literature. *Climate Policy*, 19 (9): 1186-1204. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1639490>
- Magrini M.-B.; Anton M.; Cholez C.; Corre-Hellou G.; Duc G.; Jeuffroy M.-H.; Meynard J.-M.; Pelzer E.; Voisin A.-S.; Walrand S., 2016. Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agrifood system. *Ecological Economics*, 126: 152-162. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.024>
- Mamy L. (coord.); Pesce S. (coord.); Sanchez W. (coord.); Amichot M.; Artigas J.; Aviron S.; Barthélémy C.; Beaudouin R.; Bedos C.; Bérard A.; Berny P.; Bertrand C.; Bertrand C.; Betoulle S.; Bureau-Point È.; Charles S.; Chaumot A.; Chauvel B.; Coeurdassier M.; Corio-Costet M.-F.; Coutellec M.-A.; Crouzet O.; Doussan I.; Douzals J.P.; Fabure J.; Fritsch C.; Gallai N.; Gonzalez P.; Gouy V.; Hedde M.; Langlais A.; Le Bellec F.; Leboulanger C.; Margoum C.; Martin-Laurent F.; Mongruel R.; Morin S.; Mouglin C.; Munaron D.; Nelieu S.; Pélosi C.; Rault M.; Ris N.; Sabater S.; Stachowski-Haberkorn S.; Sucre E.; Thomas M.; Tournebize J.; Achard A.L.; Le Gall M.; Le Perchec S.; Delebarre E.; Larras F.; Leenhardt S. (coord.), 2022. Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. Rapport de l'expertise scientifique collective: INRAE/IFREMER (France), 1408 p. <https://doi.org/10.17180/Ogp2-cd65>
- Martin A.R.; Cadotte M.W.; Isaac M.E.; Milla R.; Vile D.; Violle C., 2019. Regional and global shifts in crop diversity through the Anthropocene. *Plos One*, 14 (2): 18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209788>
- Marzin J.; Freguin-Gresh S.; Angeon V.; Andrieu N.; Banoviez Urrutia V.; Cerdan C.; Huat J.; Daviron B., 2021. Étude sur les freins et leviers à l'autosuffisance alimentaire : vers de nouveaux modèles agricoles dans les départements et régions d'outre-mer: Cirad, chemin de Baillarguet, 34980 Montferrier-sur-Lez. <https://hal.inrae.fr/hal-03528053>
- Meemken E.M.; Qaim, M., 2018. Organic Agriculture, Food Security, and the Environment. In: Rausser, G.C.; Zilberman, D., eds. *Annual Review of Resource Economics*, Vol 10. Palo Alto: Annual Reviews (Annual Review of Resource Economics), 39-63. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100517-023252>
- Meynard J.M. (coord.); Messean A. (coord.); Charlier A.; Charrier F.; Fares M.h.; Le Bail M.; Magrini M.-B., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Étude au niveau des exploitations agricoles et des filières: auto-saisine. Inra (France), 52 p. <https://doi.org/10.15454/dqgg-d850>
- Morandini L.A.; Long R.F.; Kremen C., 2016. Pest Control and Pollination Cost-Benefit Analysis of Hedgerow Restoration in a Simplified Agricultural Landscape. *Journal of Economic Entomology*, 109 (3): 1020–1027. <https://doi.org/10.1093/jee/tow086>
- Oerke E.-C., 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144 (1): 31-43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>

- Oerke E.-C.; Dehne H.-W., 2004. Safeguarding production—losses in major crops and the role of crop protection. *Crop Protection*, 23 (4): 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.10.001>
- OFB, 2022. Dossier « La haie, enjeux écologiques ». Biodiversité, des clés pour agir, (1): 18-39. <https://www.ofb.gouv.fr/documentation/biodiversite-des-cles-pour-agir-ndeg1>
- Pe'er G.; Finn J.A.; Diaz M.; Birkenstock M.; Lakner S.; Roder N.; Kazakova Y.; Sumrada T.; Bezak P.; Concepcion E.D.; Danhardt J.; Morales M.B.; Rac I.; Spulerova J.; Schindler S.; Stavrinides M.; Targetti S.; Viaggi D.; Vogiatzakis I.N.; Guyomard H., 2022. How can the European Common Agricultural Policy help halt biodiversity loss? Recommendations by over 300 experts. *Conservation Letters*: 1-12. <https://doi.org/10.1111/conl.12901>
- Pe'er G.; Lakner S., 2020. The EU's Common Agricultural Policy Could Be Spent Much More Efficiently to Address Challenges for Farmers, Climate, and Biodiversity. *One Earth*, 3 (2): 173-175. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.004>
- Pe'er G.; Zingrebe Y.; Moreira F.; Siram, C.; Schindler S.; Mueller R.; Bontzorlos V.; Clough D.; Bezak P.; Bonn A.; Hansjurgens B.; Lomba A.; Mockel S.; Passoni G.; Schleyer C.; Schmidt J.; Lakner S., 2019. A greener path for the EU Common Agricultural Policy. *Science*, 365 (6542): 449-451. <https://doi.org/10.1126/science.aax3146>
- Pellerin S. (coord.); Bamière L. (coord.); Angers D.; Béline F.; Benoit M.; Butault J.-P.; Chenu C.; Colnenne-David C.; de Cara S.; Delame N.; Doreau M.; Dupraz P.; Faverdin P.; Garcia-Launay F.; Hassouna M.; Hénault C.; Jeuffroy M.-H.; Klumpp K.; Metay A.; Moran D.; Recous S.; Samson E.; Savini I.; Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, Inra (France), 92 p. <https://doi.org/10.15454/rgfm-wh23>
- Poniso L.C.; M'Gonigle L.K.; Mace K.C.; Palomino J.; de Valpine P.; Kremen C., 2015. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 282 (1799): 7. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>
- Rakotonindraina T.; Chauvin J.-É.; Pellé R.; Faivre R.; Chatot C.; Savary S.; Aubertot J.-N., 2012. Modeling of Yield Losses Caused by Potato Late Blight on Eight Cultivars with Different Levels of Resistance to *Phytophthora infestans*. *Plant Disease*, 96 (7): 935-942. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-11-0752>
- Raseduzzaman M.; Jensen E.S., 2017. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production ? A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 91: 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.09.009>
- Recanati F.; Maughan C.; Pedrotti M.; Dembska K.; Antonelli M., 2019. Assessing the role of CAP for more sustainable and healthier food systems in Europe: A literature review. *Science of the Total Environment*, 653: 908-919. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.377>
- Redhead J.W.; Oliver T.H.; Woodcock B.; Pywell R.F., 2020. The influence of landscape composition and configuration on crop yield resilience. *Journal of Applied Ecology*, 57 (11): 2180-2190. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13722>
- Reiss E.R.; Drinkwater L.E., 2018. Cultivar mixtures: a meta-analysis of the effect of intraspecific diversity on crop yield. *Ecological Applications*, 28 (1): 62-77. <https://doi.org/10.1002/eap.1629>
- Rosa-Schleich J.; Loos J.; Musshoff O.; Tschardt T., 2019. Ecological-economic trade-offs of Diversified Farming Systems - A review. *Ecological Economics*, 160: 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.03.002>
- Sauquet A., 2021. Ex-post analysis of the crop diversification policy of the CAP Greening in France. Montpellier: CEE-M, 34 p. <https://hal.inrae.fr/hal-03455548>
- Savary S.; Willocquet L.; Pethybridge S.J.; Esker P.; McRoberts N.; Nelson A., 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3 (3): 430-439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
- Sirami C.; Gross N.; Baillod A.B.; Bertrand C.; Carrie R.; Hass A.; Henckel L.; Miguet P.; Vuillot C.; Alignier A.; Girard J.; Batary P.; Clough Y.; Violle C.; Giralte D.; Bota G.; Badenhauer I.; Lefebvre G.; Gauffre B.; Vialatte A.; Calatayud F.; Gil-Tena A.; Tischendorf L.; Mitchell S.; Lindsay K.; Georges R.; Hilaire S.; Recasens J.; Sole-Senan X.O.; Robleno I.; Bosch J.; Barrientos J.A.; Ricarte A.; Marcos-Garcia M.A.; Minano J.; Mathevet R.; Gibon A.; Baudry J.; Balent G.; Poulin B.; Burel F.; Tschardt T.; Bretagnolle V.; Siriwardena G.; Ouin A.; Brotons L.; Martin J.L.; Fahrig L., 2019. Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116 (33): 16442-16447. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906419116>
- Sirami C.; Midler E., 2021. Hétérogénéité des paysages agricoles, biodiversité et services écosystémiques. Analyse n°163: Centre d'étude et de Prospective, Les publications du service de la statistique et de la prospective, 4. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Ana163/detail/>
- Solagro, 2019. Les infrastructures agro-écologiques 30. <https://osez-agroecologie.org/bibliographie-de-l-agroecologie>
- Struik P.C.; Bonciarelli F., 1997. Resource use at the cropping system level. *European Journal of Agronomy*, 7 (1-3): 133-143. [https://doi.org/10.1016/s1161-0301\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/s1161-0301(97)00027-0)

- Swinen J.; Anania G.; Balmann A.; Buckwell A.; Bureau J.-C.; De Castro P.; Di Mambro A.; Erjavec E.; Erjavec K.; Fertő I.; Garrone M.; Haniotis T.; Hart K.; Josling T.E.; Knops L.; Kovacs A.; Lovcic M.; Mahé L.-P.; Matthews A.; Moehler R.; Olper A.; Pacca L.; Potocnik J.; Pupo d'Andrea M.R.; Roederer-Ryning C.; Sahrbacher A.; Sahrbacher C.; Swinbank A.; CEPS, 2015. The political economy of the 2014-2020 Common Agricultural Policy. an imperfect storm. Totowa NJ (USA): Rowman and Littlefield.
- Tamburini G.; Bommarco R.; Wanger T.C.; Kremen C.; van der Heijden M.G.A.; Liebman M.; Hallin S., 2020. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, 6 (45): 8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715>
- Therond O. (coord.); Tichit M. (coord.); Tibi A. (coord.); Accatino F.; Biju-Duval L.; Bockstaller C.; Bohan D.; Bonaudo T.; Boval M.; Cahuzac E.; Casellas E.; Chauvel B.; Choler P.; Constantin J.; Cousin I.; Daroussin J.; David M.; Delacote P.; Derocles S.; de Sousa L.; Domingues J.P.; Dross C.; Duru M.; Eugène M.; Fontaine C.; Garcia B.; Geijzendorffer I.R.; Girardin A.; Graux A.-I.; Jouven M.; Langlois B.; Le Bas C.; Le Bissonnais Y.; Lelievre V.; Lifran R.; Maigné É.; Martin G.; Martin-Laurent F.; Martinet V.; McLaughlin O.; Meillet A.; Mignolet C.; Mouchet M.; Nozieres-Petit M.-O.; Ostermann O.P.; Paracchini M.L.; Pellerin S.; Peyraud J.-L.; Petit S.; Picaud C.; Plantureux S.; Poméon T.; Porcher E.; Puech T.; Puillet L.; Rambonilaza T.; Raynal H.; Resmond R.; Ripoche D.; Ruget F.; Rulleau B.; Rusch A.; Salles J.-M.; Sauvant D.; Schott C.; Tardieu L., 2017. Volet "écosystèmes agricoles" de l'Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques. Rapport scientifique de l'étude réalisée par l'Inra. Inra (France), 966. <https://doi.org/10.15454/prmv-wc85>
- Thies C.; Roschewitz I.; Tscharrntke T., 2005. The landscape context of cereal aphid-parasitoid interactions. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 272 (1559): 203-210. <https://doi.org/10.1098/rspb.2004.2902>
- Thoyer S.; Després C.; Le Bail M.; Meynard J.M.; Messean A., 2014. La diversification des cultures pour limiter les impacts environnementaux : freins et leviers agronomiques et économiques en France. Quelques propositions pour les exploitations, les filières et la PAC. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 4 (1): 63-69. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01198249>
- Tibi A. ; Therond O., 2017. Évaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFES. Synthèse du rapport d'étude. Inra (France), 118 p. <https://doi.org/10.15454/1h4z-tq90>
- Tibi A. (coord.), Forslund A. (coord.), Debaeke P. (coord.), Schmitt B. (coord.), Guyomard H. (coord.), Marajo-Petitzon E., Ben-Ari T., Bérard A., Bispo A., Durand J.-L., Faverdin P., Le Gouis J., Makowski D., Planton S. (2020). Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire. Rapport de synthèse de l'étude. INRAE (France), 159 p + Annexes. <https://doi.org/10.15454/pz5b-v806>
- Tscharrntke T., Grass I., Wanger T.C., Westphal C., Batary P., 2021. Beyond organic farming - harnessing biodiversity-friendly landscapes. *Trends in Ecology & Evolution*, 36 (10): 919-930. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.010>
- Tscharrntke T., Steffan-Dewenter I., Krüess A., Thies C., 2002. Contribution of small habitat fragments to conservation of insect communities of grassland-cropland landscapes. *Ecological Applications*, 12 (2): 354-363. <https://doi.org/10.2307/3060947>
- Van der Werf W.; Zhang L.Z.; Li C.J.; Chen P.; Feng C.; Xu Z.; Zhang C.C.; Gu C.F.; Bastiaans L.; Makowski D.; Stomph T., 2021. COMPARING PERFORMANCE OF CROP SPECIES MIXTURES AND PURE STANDS. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8 (3): 481-489. <https://doi.org/10.15302/j-fase-2021413>
- van Ittersum M.K.; Rabbinge R., 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52 (3): 197-208. [https://doi.org/10.1016/s0378-4290\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(97)00037-3)
- Védrine L.; Larmet V., 2021. Additionnalité des Mesures Agro-Environnementales et Climatiques: évaluation contrefactuelle de l'efficacité environnementale. Dijon: INRAE-CESAER. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03502522>
- Verjux N.; Bonin L.; Doucet R.; Gaucher D.; Maumene C.; Perriot B.; Simonneau D., 2017. Protection intégrée en grandes cultures : réalités et perspectives. AFPP – 6e conférence sur les moyens alternatifs de protection pour une production intégrée. 2017, 11.
- Vialatte A.; Tibi A.; Alignier A.; Angeon V.; Bedoussac L.; Bohan D.A.; Bougherara D.; Carpentier A.; Castagnérol B.; Cordeau S.; Courtois P.; Deguine J.P.; Enjalbert J.; Fabre F.; Femenia F.; Fréville H.; Goulet F.; Grateau R.; Grimonprez B.; Gross N.; Hannachi M.; Jeanneret P.; Kuhfuss L.; Labarthe P.; Launay M.; Lefebvre M.; Lelievre V.; Lemarie S.; Martel G.; Masson A.; Navarrete M.; Plantegenest M.; Ravigné V.; Rusch A.; Suffert F.; Tapsoba A.; Therond O.; Thoyer S.; Martinet V., 2021. Promoting crop pest control by plant diversification in agricultural landscapes: A conceptual framework for analysing feedback loops between agro-ecological and socio-economic effects. In: Bohan D.A.; Dumbrell A.J.; Vanbergen A.J., eds. *Future of Agricultural Landscapes, Pt Iii*. San Diego: Elsevier Academic Press Inc (Advances in Ecological Research), 133-165. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2021.10.004>
- Vieux F.; Perignon M.; Gazan R.; Darmon N., 2018. Dietary changes needed to improve diet sustainability: are they similar across Europe. *European Journal of Clinical Nutrition*, 72: 951-960. <https://doi.org/10.1038/s41430-017-0080-z>

- Vieux F.; Privet L.; Soler L.G.; Irz X.; Ferrari M.; Sette S.; Raulio S.; Tapanainen H.; Hoffmann R.; Surry Y.; Pulkkinen H.; Darmon N., 2020. More sustainable European diets based on self-selection do not require exclusion of entire categories of food. *Journal of Cleaner Production*, 248: 119298. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119298>
- Weibull A.C.; Bengtsson J.; Nohlgren E., 2008. Diversity of butterflies in the agricultural landscape: the role of farming system and landscape heterogeneity. *Ecography*, 23 (6): 743-750. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0587.2000.230611.x>
- Willocquet L.; Félix I.; de Vallavieille-Pope C.; Savary S., 2018. Reverse modelling to estimate yield losses caused by crop diseases. *Plant Pathology*, 67 (8): 1669-1679. <https://doi.org/10.1111/ppa.12873>
- Zhao J.; Chen J.; Beillouin D.; Lambers H.; Yang Y.D.; Smith P.; Zeng Z.H.; Olesen J.E.; Zang H.D., 2022. Global systematic review with meta-analysis reveals yield advantage of legume-based rotations and its drivers. *Nature Communications*, 13 (1): 9. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32464-0>

Annexe 1. Le tournant de la Politique agricole commune ouvrant la voie à la diversification végétale

Les impacts environnementaux et sanitaires d'une agriculture très productiviste deviennent plus prégnants à partir de la fin des années 80, du fait de l'attention croissante que portent l'opinion et les pouvoirs publics aux enjeux de pollution des eaux, de pertes de biodiversité et de réchauffement climatique. Ces impacts s'inscrivent dans les priorités que les autorités bruxelloises doivent désormais afficher lors des réformes de la Politique agricole commune (PAC). Certains auteurs associent le tournant environnemental de la PAC à la réforme de 1992, avec la montée en puissance du concept d'agriculture multifonctionnelle. D'autres l'identifient plus tard, lors de la réforme Agenda 2000 qui, en 1999, a instauré le deuxième pilier de la PAC doté d'un fonds dédié au développement rural et à l'agroenvironnement (FEADER). Mais, l'affirmation forte que les aides du premier pilier de la PAC doivent être associées à la fourniture de biens publics environnementaux (« *public money for public good* ») s'est réellement concrétisée d'abord avec la conditionnalité des aides en 2003, puis avec le « verdissement » introduit dans la réforme de 2014. La France accompagne ce mouvement d'écologisation des politiques publiques agricoles avec des mesures qui ouvrent la voie à une diversification végétale.

La nouvelle PAC, votée fin 2021 par le Parlement et le Conseil de l'Union européenne, entrera en vigueur au 1^{er} janvier 2023⁹⁵. Cette nouvelle programmation s'inscrit aussi dans le Pacte Vert pour l'Europe (le Green Deal) qui vise à transformer l'économie de l'Europe pour répondre aux défis du développement durable en s'appuyant sur des investissements à hauteur de 1000 milliards d'euros sur 10 ans pour lutter contre le changement climatique, promouvoir une économie propre et circulaire, et enrayer les pertes de biodiversité. La grande nouveauté de cette future PAC est de passer d'un système centralisé, organisé et contrôlé depuis Bruxelles, et fondé sur des obligations de moyens pour les Etats-membres, à un système donnant plus de responsabilité et de liberté d'action aux Etats-membres, tenus de se donner des objectifs et de démontrer qu'ils atteignent des résultats. Il est attendu de ce changement de paradigme une application mieux adaptée au contexte local et aux besoins. Concrètement, la Commission européenne propose un cadre européen commun (objectifs, indicateurs à atteindre). Les Etats-membres élaborent un plan stratégique national (PSN) détaillant la façon dont ils prévoient d'opérationnaliser les grandes catégories d'instruments prévus par le cadre commun. Ce PSN doit être approuvé par la Commission, qui assure également un suivi annuel et pluriannuel pour évaluer les résultats obtenus par les Etats-membres au regard des objectifs annoncés, et non plus des moyens.

Le verdissement de la réforme de 2014 : un constat d'échec ?

Les paiements verts du premier pilier

Outre la conditionnalité du versement des aides du premier pilier au respect de Bonnes Conditions Agricoles et Outre la conditionnalité du versement des aides du premier pilier au respect de Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales (BCAE)⁹⁶, le « verdissement » de la programmation 2014-2020 conditionne l'obtention des paiements surfaciques du premier pilier à la mise en œuvre de trois pratiques :

- le **maintien ou la réhabilitation de 5 % de la surface arable de l'exploitation agricole en surfaces d'intérêt écologique (SIE)**, pour les exploitations ayant plus de 15 ha de terres arables. Les SIE englobent les infrastructures semi-naturelles susceptibles d'accueillir la biodiversité (mares, haies, arbres isolés et bosquets, terrasses, murets), et les surfaces susceptibles de la favoriser en contribuant à la réduction de l'usage des intrants chimiques (jachères, bandes tampons, cultures dérobées piège à nitrate, couverture hivernale) ;
- la **diversification des cultures**. L'assolement doit inclure au moins deux cultures⁹⁷ (trois pour les exploitations de plus de 30 ha), dont la principale ne doit pas couvrir plus de 75 % de la sole totale (et la culture minoritaire pas moins de 5 % pour les exploitations de plus de 30 ha) ;

⁹⁵ Le processus de négociations ainsi que le renouvellement du Parlement et de la Commission européenne, le Brexit et la crise sanitaire ont fortement ralenti le processus de réforme. Le dispositif 2014-2020 de la PAC a donc été maintenu en 2021-2022.

⁹⁶ Parmi les sept BCAE à respecter, trois concernaient la diversification végétale : BCAE 1 imposant l'implantation de bandes tampon le long des cours d'eau, BCAE 4 imposant la couverture minimale des sols, et BCAE 6 imposant le maintien des particularités topographiques (haies, mares, bosquets). De fait, l'éco-conditionnalité s'est avérée relativement peu efficace pour améliorer la performance environnementale de l'agriculture en raison d'un système de contrôle insuffisant (CCE, 2008) et de sanctions souvent trop peu dissuasives, voire non appliquées en cas de non-respect des BCAE (Bodiguel, 2009 ; Desjeux *et al.*, 2011).

⁹⁷ Les cultures sont distinguées par leur genre botanique.

- le **maintien des prairies permanentes**⁹⁸ avec l'obligation de ne pas augmenter le ratio national entre surfaces arables et surfaces en prairies permanentes de plus de 5 % par rapport à une période de référence (2015 pour la plupart des Etats membres), et l'interdiction stricte de retourner les prairies permanentes sensibles (notamment celles situées en zone Natura 2000, représentant en 2021 1,18 Mha).

La plupart des résultats d'évaluation de ces mesures montrent cependant un effet additionnel très limité de ces paiements verts sur le niveau de diversité végétale des exploitations agricoles et des paysages. Des simulations conduites par le Joint Research Center de la Commission Européenne (Louhichi *et al.*, 2018) montrent qu'à l'échelle européenne, seulement 4,5 % de la surface agricole utilisée a changé d'affectation du fait du verdissement. La mesure de diversification des cultures, en particulier, n'a eu que très peu d'effets (seulement 1,8 % de la surface réaffecté à d'autres cultures)⁹⁹.

Les raisons de ces résultats globalement décevants ont été documentées par des études académiques et par la Cour des Comptes européenne (CCE, 2017). D'une part, **les objectifs fixés étaient relativement peu ambitieux et déjà respectés par une large proportion des exploitations agricoles européennes.** En France, 85 % des exploitations respectaient déjà les mesures de verdissement avant leur mise en place, ces dernières ne forçant donc qu'une exploitation sur huit à introduire une nouvelle culture, et sur des surfaces très petites (Sauquet, 2021). D'autre part, **de très nombreuses exceptions ont été instaurées** (exploitations de moins de 10 ou 15 ha de terres arables selon les mesures, exploitations classées comme « vertes en soi » – notamment celles en agriculture biologique). A l'échelle européenne, 45 % des exploitations représentant 14 % de la surface agricole utilisée n'étaient donc pas concernés par les obligations de verdissement (Louhichi *et al.*, 2018). S'y sont ajoutés **les régimes dérogatoires et les exceptions négociées par les Etats-membres.** En France, c'est le cas de la certification des exploitations spécialisées de maïs (notamment en Aquitaine), qui a permis à ces exploitations de maintenir la monoculture¹⁰⁰. C'est aussi le cas de l'élargissement de la définition des SIE aux jachères, cultures de légumineuses et taillis à courte rotation notamment, permettant à de nombreuses exploitations céréalières du Centre et du Nord de respecter le pourcentage de 5 % de SIE requis sans réimplanter d'infrastructures naturelles, en augmentant légèrement leurs surfaces en légumineuses (Thoyer *et al.*, 2014). Pour la mesure prairies permanentes, la possibilité d'avoir un objectif régional et non individualisé sur le ratio prairies permanentes/surfaces arables a, là aussi, allégé les obligations pesant sur les exploitations.

Les aides agro-environnementales du deuxième pilier

La politique de développement rural de la PAC s'appuie entre autres sur les mesures agro-environnementales et climatiques (MAEC) pour accompagner les exploitations agricoles qui s'engagent *volontairement* dans le développement (ou le maintien) de pratiques combinant performances économique et environnementale. Concrètement, les MAEC prennent la forme de contrats passés avec les agriculteurs, prévoyant une indemnisation des surcoûts et manques à gagner que ces pratiques entraînent.

La programmation de 2014-2021 reprend les mêmes principes que les dispositifs de la précédente, certains incitant à la diversification végétale :

- des MAEC répondant à une logique de système (grandes cultures, polyculture-élevage, systèmes d'exploitation herbagers et pastoraux) incitant ainsi à une reconception du système de cultures à l'échelle de l'exploitation agricole. Les MAEC système « grandes cultures » requièrent une augmentation progressive du **nombre de cultures** (pour atteindre un minimum de 5 cultures différentes en année 5), **l'introduction de cultures légumineuses** (au moins 5 % à partir de la deuxième année), et la **limitation du retour d'une même culture sur une parcelle**. Pour les systèmes « herbagers et pastoraux », elles contraignent au **maintien de la surface toujours en herbe** et à l'amélioration de leur biodiversité (présence de certaines plantes indicatrices de la bonne santé et de la diversité). En polyculture-élevage, l'engagement porte sur la **part maximale de maïs dans la surface fourragère et la part minimale d'herbe dans la surface agricole utilisée** (parts fixées à l'échelle régionale).
- des MAEC localisées répondant à des enjeux agro-environnementaux et climatiques régionaux. Contrairement aux MAEC systèmes, les MAEC localisées concernent des engagements pris non pas sur l'ensemble de l'exploitation mais sur certaines parcelles, ainsi que vis-à-vis des éléments linéaires (haies, fossés) ou ponctuels (mares, arbres). Certaines portent directement sur la nature et la diversité des couverts : les mesures COUVER, qui portent sur la **couverture des sols** (par exemple enherbement sous cultures ligneuses, couverture des inter-rangs de vignes, création de bandes enherbées), et les mesures LINEA, sur **l'entretien de haies, arbres, bosquets, talus, et ripisylves**.

⁹⁸ Surface dans laquelle l'herbe ou d'autres plantes fourragères herbacées prédominent depuis au moins cinq ans révolus.

⁹⁹ Sauf dans certaines régions européennes caractérisées par une agriculture très intensive avec beaucoup de monoculture de maïs, comme la Lombardie, au nord de l'Italie (Bertonni *et al.*, 2018).

¹⁰⁰ En invoquant un principe d'équivalence à la mesure verte de diversification : assurer une couverture hivernale des sols.

- des MAEC répondant à l'objectif de préservation des ressources génétiques, notamment, en ce qui concerne les ressources végétales, en visant la conservation ou la réintégration, dans le système de production, de **variétés localement et régionalement adaptées et menacées d'érosion génétique** (cultures légumières, arboriculture et plantes médicinales).

Étant donné le faible recul temporel de ces mesures, il est difficile d'établir un bilan de leur efficacité, au-delà d'une analyse statistique du nombre d'exploitations ayant souscrit et de l'évolution des surfaces concernées. Ainsi, les MAEC systèmes ont été relativement peu souscrites en France, notamment celle relative aux grandes cultures jugée trop contraignante (en 2020, selon l'Observatoire du développement rural d'INRAE, on compte 140 exploitations engagées dans cette MAEC sur 17200 ha). A titre informatif, l'analyse de l'impact des MAEC « systèmes » et « localisées » de la programmation 2007-2013 de la PAC (Védrine et Larmet, 2021) montre qu'en France, à l'exception de la MAEC système « polyculture-élevage ruminant » qui s'est accompagnée d'une hausse significative du nombre de cultures de l'ordre de 15 à 20 % dans les exploitations bénéficiaires par rapport à des exploitations non bénéficiaires équivalentes, les autres mesures n'ont eu que des effets très mineurs voire nuls sur la diversité culturelle. Ces résultats concordent avec ceux obtenus à l'échelle européenne, qui mettent en évidence un effet moyen positif des MAE (confondues) sur le nombre de cultures des exploitations bénéficiaires en Grande Bretagne et en Italie, mais ne trouvent pas d'effet significatif pour l'Allemagne, l'Espagne et la France (Arata et Sckockai, 2016). Toujours d'après Védrine et Larmet (2021), les MAEC localisées ont eu un effet modéré mais réel pour améliorer la présence d'éléments semi-naturels dans et en pourtour des parcelles engagées.

Les promesses de la réforme de la PAC post 2020

Les grandes lignes de la réforme concernant l'environnement

Le paiement vert mis en place sur la période 2014-2020 est abandonné dans la future programmation. Il est remplacé par une conditionnalité plus ambitieuse (renforcée) qui intègre les exigences des mesures vertes, et par l'obligation pour les Etats membres de dédier 25 % des aides directes du premier pilier à des « écorégimes » (Figure 1). Ces programmes, positionnés dans le premier pilier, doivent être élaborés par les Etats membres dans le cadre de leur PSN. Il s'agit de mesures environnementales annuelles proposées aux agriculteurs *volontaires*, qui doivent aller au-delà des exigences de la conditionnalité. L'ensemble des aides ciblées sur les enjeux climatiques et environnementaux doit aussi atteindre 40 % des budgets versés, et les États membres peuvent choisir de faire glisser une partie de leur budget du premier pilier vers le second, et vice-versa. Cette **sanctuarisation des budgets dédiés à l'environnement et au climat**, et la flexibilité accrue de dépenses entre les deux piliers, doivent, en théorie, permettre d'éviter une course au moins-disant et de prendre en considération les capacités différentes de cofinancement des États membres.

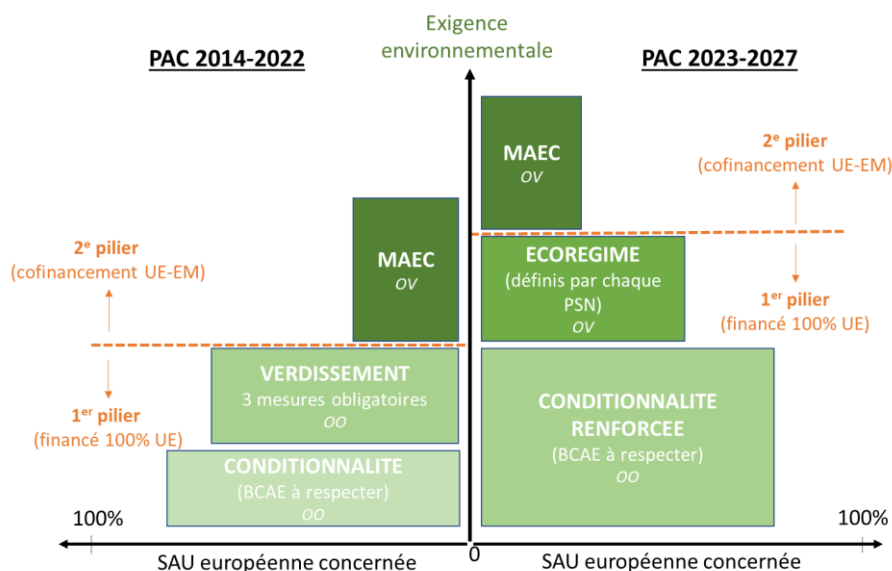


Figure 1. Représentation schématique de l'architecture des paiements de la Politique agricole commune (PAC) liés à des cahiers des charges environnementaux. Adapté de Pe'er *et al.* (2022)

UE : Union européenne ; EM : Etats membres ; PSN : Plan stratégique nationale.

OO : obligatoire pour les EM et pour les agriculteurs ; OV : obligatoire pour les EM et volontaire pour les agriculteurs.

Le plan stratégique national français

Le PSN français¹⁰¹, décrit, entre autres, les mesures de conditionnalité renforcée et l'écorégime français autour de trois grandes voies d'accès. Notons aussi que la future PAC inclut dans le second pilier un système d'assurance récolte nouveau, qui, lui aussi peut avoir un impact sur les choix de diversification des exploitants agricoles, et quelques MAEC nouvelles.

Au sein du premier pilier, la **conditionnalité renforcée** introduit des nouvelles BCAE et renforce celles qui existaient déjà pour obtenir le paiement vert de la PAC 2014-2020. Les obligations susceptibles d'influer sur la diversification végétale concernent désormais l'interdiction de convertir des prairies permanentes et la protection des prairies sensibles, la couverture minimale des sols durant certaines périodes, un seuil minimal de 3% d'infrastructures agroécologiques sur l'exploitation et un socle minimal de rotation des cultures renforçant la diversité des cultures à l'échelle de l'exploitation.

Les **écorégimes** sont quant à eux conçus, selon le Ministère de l'Agriculture français, pour être « *inclusifs et non discriminants* », « *accessibles à tous* » et « *simples* »¹⁰². L'objectif est que tous les systèmes de production et tous les exploitants puissent avoir la possibilité d'entrer dans un des écorégimes proposés et ainsi maintenir leur enveloppe d'aide. Pour rendre cela possible, plusieurs niveaux d'exigences ont été définis dans les cahiers des charges. Le paiement de l'écorégime est versé sur tous les hectares de l'exploitation. Trois voies alternatives permettent d'accéder à ces aides, chacune impliquant des formes spécifiques de diversification végétale plus ou moins poussée :

- La voie des pratiques agro-écologiques, consistant à mettre en œuvre certaines pratiques favorables à la réduction des pesticides, à la biodiversité et au stockage de carbone sur la totalité des surfaces de l'exploitation : le maintien d'une part significative de **prairies permanentes** non labourée (80 à 90 % selon le niveau d'exigence visé) ; la **couverture végétale des inter-rangs** (enherbement ou mulchs végétaux) dans les cultures permanentes (75 à 95 % des inter-rangs) ; le maintien d'une **diversité des assolements** sur les terres arables (mesurée par un système à points attribués en fonction du nombre de grandes catégories de cultures plantées) en privilégiant les légumineuses, les cultures de diversification et les prairies.
- La voie des « éléments de paysage et surfaces favorables à la biodiversité », consistant à dédier au moins 7 ou 10 % (selon le niveau d'exigence visé) de la surface agricole utilisée à des **infrastructures agro-écologiques**¹⁰³ ou terres en jachères.
- La voie de la certification environnementale de l'exploitation, *a minima* en certification de niveau 2+ pour atteindre le niveau bas, en Haute valeur environnementale¹⁰⁴ pour atteindre le niveau médian, ou en Agriculture biologique pour atteindre le niveau haut.

Enfin, un bonus haies marque l'ambition que la France souhaite porter sur la restauration de ces éléments semi-naturels¹⁰⁵, en rémunérant la présence de haies (qui doivent atteindre 6 % minimum des terres arables) et leur gestion durable (vérifiée par certification, le « Label Haie »).

Dans le second pilier, on note l'introduction de MAEC forfaitaires, c'est à dire payées par exploitation et non par hectare souscrit. On peut noter la proposition d'une nouvelle MAEC « transition des pratiques » à obligation de résultats (objectif défini de façon personnalisée à atteindre en 5 ans), dont l'objectif est de **compenser le risque de perte de revenus associé à une transition agro-écologique** (vers d'autres systèmes que l'AB). La rémunération sur base forfaitaire sera déterminée à partir des caractéristiques moyennes des exploitations agricoles française (surface agricole utilisée moyenne notamment). **Parmi les objectifs éligibles (à prioriser par les régions), on retrouve la réduction des pesticides d'au moins 30 %, ainsi que l'amélioration du bilan carbone d'au moins 15 %, ou l'amélioration de l'autonomie protéique de l'élevage, trois objectifs susceptibles de contribuer à la diversification végétale.**

¹⁰¹ <https://agriculture.gouv.fr/pac-2023-2027-le-plan-strategique-national>

¹⁰² Communication du Ministère de l'Agriculture sur les arbitrages du PSN - <https://agriculture.gouv.fr/reforme-de-la-pac-julien-denormandie-presente-les-arbitrages-du-plan-strategique-national> (21/05/2021)

¹⁰³ Hors cultures fixant l'azote et culture dérobées.

¹⁰⁴ <https://agriculture.gouv.fr/la-haute-valeur-environnementale-une-mention-valorisante-pour-les-agriculteurs-et-leurs-pratiques>. A noter que le cahier des charges HVE sera rénové à l'automne 2022.

¹⁰⁵ Pour les deux premières voies d'accès, l'exploitant peut aussi prétendre, de manière additionnelle, à un *bonus haies* de 7€/ha lorsqu'il démontre (par une certification dont les principes doivent être précisés) qu'il gère durablement ses haies qui doivent couvrir au moins 6 % de sa surface agricole utilisée.

Annexe 2. Composition du collectif de travail¹⁰⁶

► Pilotage de l'ESCo

Vincent Martinet, INRAE, UMR Paris-Saclay Applied Economics – *Économie de l'environnement et des ressources naturelles, économie écologique. Co-pilote scientifique.*

Anaïs Tibi, INRAE, UAR DEPE – *Coordination du projet.*

Aude Vialatte, INRAE, UMR DYNAFOR – *Agroécologie des paysages, régulation naturelle des bioagresseurs. Co-pilote scientifique.*

► Experts scientifiques principaux : réalisation de l'analyse bibliographique

Audrey Alignier, INRAE, UMR BAGAP – *Agroécologie des paysages ; part non cultivée des paysages, biodiversité associée et services écosystémiques.*

Nicolas Gross, INRAE, UMR UREP – *Agroécologie du paysage ; part non cultivée des paysages.*

Valérie Angeon, INRAE, UR ECODEVELOPPEMENT – *Économie territoriale, économie du développement ; transition agroécologique des économies ultramarines.*

Mourad Hannachi, INRAE, UMR SADAPT – *Sciences de gestion ; coordination, action collective dans les territoires et les filières.*

David A. Bohan, INRAE, UMR Agroécologie – *Agroécologie des paysages ; diversification des rotations.*

Marie Launay, INRAE, US AgroClim – *Agronomie, modélisation biophysique ; agencement spatial du couvert intra-parcellaire.*

Douadia Bougherara, INRAE, UMR CEE-M – *Économie agricole et de l'environnement, économie expérimentale ; diversification des rotations et des assolements.*

Stéphane Lemarié, INRAE, UMR GAEL – *Économie industrielle, économie de l'innovation ; diversité intra- et interspécifique intra-parcellaire.*

Stéphane Cordeau, INRAE, UMR Agroécologie – *Agronomie et agroécologie ; diversité interspécifique intra-parcellaire.*

Gilles Martel, INRAE, UMR BAGAP – *Zootéchnie ; systèmes d'exploitations intégrés, diversification des cultures.*

Pierre Courtois, INRAE, UMR CEE-M – *Économie de l'environnement et des ressources naturelles ; coordination de l'action collective.*

Mireille Navarrete, INRAE, UR ECODEVELOPPEMENT – *Agronomie système ; diversification des rotations et des assolements.*

Jean-Philippe Deguine, Cirad, UMR PVBMT – *Agroécologie et protection des cultures ; part non cultivée des paysages, systèmes diversifiés ultramarins.*

Manuel Plantegenest, L'Institut Agro, UMR IGEPP – *Écologie des communautés d'arthropodes ; diversification des rotations.*

Jérôme Enjalbert, INRAE, UMR GQE – *Génétique des populations, amélioration des plantes ; mélanges de variétés et d'espèces.*

Virginie Ravigné, Cirad, UMR PHIM – *Épidémiologie, écologie évolutive ; diversité cultivée du paysage, biodiversité associée et services écosystémiques, systèmes diversifiés ultramarins.*

Frédéric Fabre, INRAE, UMR SAVE – *Épidémiologie végétale, écologie du paysage ; diversité cultivée du paysage.*

Adrien Rusch, INRAE, UMR SAVE – *Écologie des communautés, écologie du paysage ; biodiversité associée et services écosystémiques.*

Hélène Fréville, INRAE, UMR AGAP Institut – *Biologie évolutive, génétique des populations, amélioration des plantes ; diversité intra-spécifique intra-parcellaire.*

Frédéric Suffert, INRAE, UR BIOGER – *Épidémiologie végétale, phytopathologie, mycologie ; diversité intra-spécifique intra-parcellaire.*

Benoît Grimonprez, Université de Poitiers, CECOJI – *Sciences juridiques ; règles applicables aux pratiques de diversification végétale.*

Sophie Thoyer, INRAE, UMR CEE-M – *Économie agricole et de l'environnement ; politiques publiques agricoles.*

¹⁰⁶ En italique : le cas échéant, compétences disciplinaires et/ou thématiques mobilisées dans l'ESCo. UMR : Unité mixte de recherche ; UAR : Unité d'appui à la recherche ; UR : Unité de recherche ; US : Unité de service.

► Experts scientifiques contributeurs ponctuels : contribution à l'analyse bibliographique

Laurent Bedoussac, ENSFEA, INRAE, UMR AGIR – *Agronomie ; diversité interspécifique intra-parcellaire.*

Alain Carpentier, INRAE, UMR SMART – *Économie de la production agricole.*

Bastien Castagneyrol, INRAE, UMR BIOGECO – *Écologie forestière, régulation naturelle des bioagresseurs.*

Fabienne Féménia, INRAE, UMR SMART – *Économie de la production agricole.*

Frédéric Goulet, Cirad, UMR Innovation – *Sociologie des politiques publiques.*

Philippe Jeanneret, Agroscope, laboratoire Agroécologie et environnement – *Agroécologie, entomologie ; part non cultivée des paysages agricoles.*

Pierre Labarthe, INRAE, UMR AGIR – *Économie de l'Innovation et de la connaissance.*

NB : Cette liste n'inclut pas les chercheurs qui ont pu être sollicités (par l'un des experts ci-dessus) pour contribuer ponctuellement à la constitution du corpus bibliographique, à la rédaction d'une section ou encore à la relecture des écrits. Ces chercheurs sont cités dans le rapport d'ESCO, dans les contributions écrites auxquelles ils ont apporté leur concours.

► Chargés de mission : réalisation d'analyses complémentaires

Abel Masson, INRAE, UAR DEPE – *Outils de modélisation pour représenter la régulation naturelle des bioagresseurs par la diversité végétale, agroforesterie.*

Abdoulaye Tapsoba, INRAE, UAR DEPE – *État des lieux des dommages causés par les principaux bioagresseurs des cultures en France.*

Comité d'encadrement :

Frédéric Fabre (INRAE, UMR SAVE)

Nicolas Parisey (INRAE, UMR IGEPP)

Lionel Roques (INRAE, UR BioSP)

Olivier Therond (INRAE, UMR LAE)

Comité d'encadrement :

Corentin Barbu (INRAE, UMR Agronomie)

Nathalie Delame (INRAE, UMR Paris-Saclay Applied Economics)

► Documentalistes : appui à la constitution du corpus, analyse bibliométrique du corpus final

Régis Grateau, INRAE, UMR Paris-Saclay Applied Economics.

Virginie Lelièvre, INRAE, Département AgroEcoSystem.

► Appui à la conduite de projet

Marc-Antoine Caillaud, INRAE, UAR DEPE – *Appui à l'organisation du colloque.*

Sandrine Gobet, INRAE, UAR DEPE – *Gestion administrative et financière, suivi logistique.*

Kim Girard, INRAE, UAR DEPE – *Gestion administrative et financière, suivi logistique.*



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