

Recherche agronomique et transition agroécologique

Thierry Caquet est Directeur Scientifique Environnement à l'INRAE, Paris. Après une première partie de carrière comme enseignant-chercheur en écologie aquatique et écotoxicologie à l'université de Paris-Sud, il a rejoint l'INRA en 2001 pour conduire des travaux sur l'évaluation de l'impact des pollutions chimiques sur les écosystèmes aquatiques. Après avoir été Chef du département d'écologie des forêts, prairies et milieux aquatiques, il est depuis juin 2017 Directeur Scientifique Environnement et membre du collège de direction de l'Institut (devenu INRAE en 2020).

1 Pourquoi faut-il une « transition agroécologique » de l'agriculture ?

Dans les pays industrialisés de la zone tempérée, l'amélioration de la productivité de l'agriculture et de sa compétitivité économique depuis les années 1950 a été permise par un processus de modernisation qui s'est traduit par la spécialisation des systèmes de production, par l'agrandissement des exploitations et par un recours accru à des intrants de synthèse (engrais, produits phytosanitaires), au machinisme agricole ainsi qu'à des variétés végétales et à des races animales à fort potentiel productif. La spécialisation des

systèmes, l'artificialisation et l'homogénéisation des milieux ont permis de faire des économies d'échelle, tant du point de vue de la production que de la collecte de produits plus standardisés, répondant mieux aux besoins des filières de transformation et des industries agroalimentaires.

Dans le même temps, **les limites du modèle de l'agriculture intensive sont devenues apparentes** : érosion de la biodiversité, pollutions, résistance des bioagresseurs¹,

1. Les bioagresseurs sont des organismes qui causent des dommages aux plantes cultivées ou aux récoltes. Il peut s'agir de ravageurs (insectes, nématodes...), d'agents phytopathogènes ou de plantes adventices.

carences nutritionnelles, mais aussi stagnation des rendements et perte de valeur ajoutée pour les agriculteurs. Les atteintes à la biodiversité et aux ressources naturelles (eau, sols...) fragilisent les agroécosystèmes², accroissent leur vulnérabilité et diminuent leur résilience³ à divers aléas dont ceux associés au changement climatique.

Pour faire face à l'augmentation de la population mondiale, aux défis environnementaux et climatiques, à la raréfaction des ressources en eau et en énergies fossiles, l'adaptation des modes de production agricole – voire leur transformation – est devenue incontournable. Ceci conduit à revisiter les questions posées à la recherche agronomique. Depuis plus d'une décennie, des efforts de recherche croissants sont ainsi consacrés à la reconception des systèmes de production en se basant sur les principes de l'agroécologie,

qui vise à augmenter la diversité fonctionnelle⁴ dans les cultures, les systèmes de culture et les paysages afin d'accroître les régulations biologiques et favoriser certaines propriétés émergentes comme par exemple, la résilience vis-à-vis des aléas climatiques.

2 L'agroécologie à la croisée des disciplines

L'agroécologie est à la fois un domaine scientifique, une pratique et un mouvement social (*Figure 1*)⁵.

Dans le champ scientifique, l'agroécologie est une approche qui intègre les concepts et méthodes d'une diversité de disciplines dont l'écologie, l'agronomie, l'économie et la sociologie. Elle mobilise aussi des connaissances locales ou traditionnelles et a pour objectifs la durabilité des systèmes de production – voire des systèmes alimentaires – ainsi que la préservation et l'utilisation durable de la biodiversité. L'interdisciplinarité, l'interaction entre disciplines et la transdisciplinarité, l'interaction entre la recherche et la

2. Les agroécosystèmes sont des écosystèmes cultivés, correspondant généralement à l'unité spatiale qu'est l'exploitation agricole et dont les fonctions écosystémiques sont valorisées par l'Homme sous forme de biens agricoles et de services.

3. Issue du latin *resilire* (« sauter en arrière »), la notion de résilience en science est d'abord apparue dans les sciences de l'ingénieur. Elle a ensuite gagné l'écologie scientifique puis la psychologie. Appliquée à l'agriculture, la résilience repose sur un potentiel d'anticipation et un processus dynamique qui mobilise une multiplicité de leviers afin de conférer aux systèmes considérés une capacité de résistance face à des perturbations, tout en favorisant leurs capacités d'adaptation, d'apprentissage et de transformation.

4. La diversité fonctionnelle d'un assemblage d'espèces représente la diversité de traits biologiques (par exemple, morphologie, cycle de vie), écologiques (par exemple, régime alimentaire, habitat) et fonctionnels (par exemple, capacité à capter de l'eau) des espèces qui le composent.

5. Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agron. Sust. Dev.*, **29**, 503-515. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00886499>

société, sont centrales dans l'agroécologie.

L'ambition pour la recherche agronomique est ici de contribuer à **repenser les systèmes agri-alimentaires** afin de favoriser les transitions vers des systèmes durables, la durabilité s'entendant selon ses trois dimensions (environnementale, sociale et économique). Plus concrètement, il s'agit de mobiliser les connaissances théoriques et pratiques afin de concevoir des modes de production qui reposent sur l'utilisation des principes et concepts issus de l'écologie afin de permettre la transition des activités agricoles vers : (i) une moindre dépendance aux intrants (par exemple, ressources énergétiques fossiles, engrais, pesticides, eau) et de limiter les impacts négatifs de leur usage ; (ii) une plus grande résilience face au changement climatique mais aussi vis-à-vis de la volatilité des prix agricoles et alimentaires ; et (iii) un renforcement des différents services⁷ fournis par les agrosystèmes (approvisionnement, régulations environnementales...).

Il s'agit de favoriser ce qu'il convient d'appeler une agroécologie « forte », c'est-à-dire

6. Caquet T., Gascuel C., Tixier-Boichard M., 2020. Agroécologie. Des recherches pour la transition des filières et des territoires. <https://www.quae.com/produit/1620/9782759231300/agroecologie-des-recherches-pour-la-transition-des-filieres-et-des-territoires>.

7. Les services écosystémiques sont définis comme étant les biens et services que les hommes peuvent tirer des écosystèmes, directement ou indirectement, pour assurer leur bien-être.

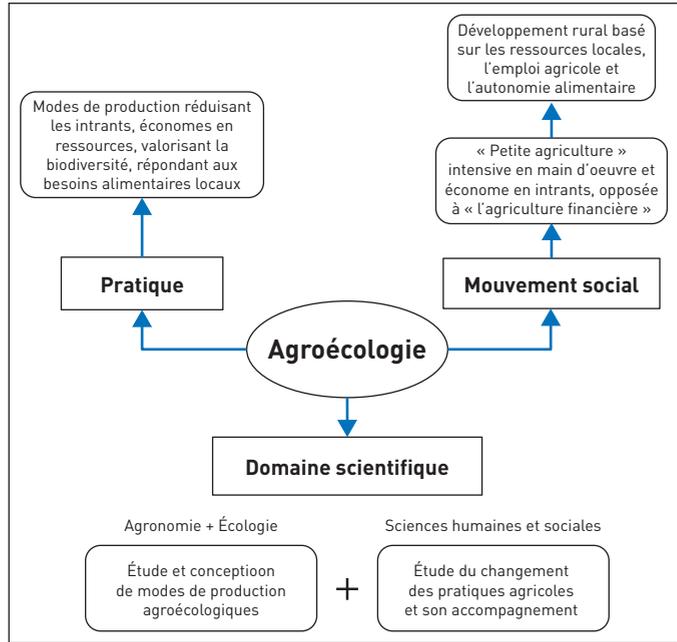


Figure 1

Les différentes dimensions de l'agroécologie (modifié d'après Caquet et al., 2020⁶).

qui mobilise les processus écologiques avec une finalité de durabilité, plutôt que de se positionner dans la continuité des systèmes actuels⁸. Ceci implique une reconception en profondeur des systèmes, au-delà de la seule phase de production, en cohérence avec les besoins de consommation et leur organisation dans les territoires.

8. Duru M., Farès M., Therond O., 2014. Un cadre conceptuel pour penser maintenant (et organiser demain) la transition agroécologique de l'agriculture dans les territoires. Cah. Agric., 23, 84-95. <https://www.cahiersagricultures.fr/articles/cagri/pdf/2014/02/cagri2014232p84.pdf>

3 Changer de paradigme

Passer de l'agriculture conventionnelle à l'agroécologie implique de passer du paradigme qui a forgé les systèmes agricoles actuels, fondé sur « l'individu idéal » et qui vise à obtenir l'animal ou le végétal le plus performant dans un environnement rendu optimal par les intrants, à **un nouveau paradigme fondé sur les interactions entre individus et leur intégration dans des écosystèmes**, qu'il s'agisse du champ ou du paysage (*Figure 2*). L'hypothèse est qu'une diversité d'individus, de variétés/races ou d'espèces sera mieux adaptée, du fait des interactions qu'ils entretiennent, à des environnements hétérogènes

et changeants. Leurs arrangements dans le temps et l'espace pourront s'avérer aussi plus efficaces, car explorant mieux les ressources en eau et en minéraux, mais surtout plus résilients aux perturbations en raison même de leur diversité. La recherche va alors s'intéresser aux propriétés fonctionnelles de la biodiversité, celles qui rendent des fonctions et services écosystémiques (fourniture de biomasse, régulation du cycle de l'eau, qualité des sols, etc.).

Plus concrètement, les principaux leviers de l'agroécologie sont les suivants :

- favoriser le recyclage des biomasses, optimiser la décomposition de la matière organique et le cycle des nutriments, notamment azote et phosphore ;
- renforcer les systèmes agricoles grâce à l'amélioration de la biodiversité, par exemple en créant des habitats pour les ennemis naturels des espèces nuisibles aux cultures ;
- fournir les conditions de sol les plus favorables à la croissance des plantes ;
- minimiser les pertes d'énergie, d'eau, de nutriments et de ressources génétiques en améliorant la conservation et la régénération des sols ;
- diversifier les espèces et les ressources génétiques au sein des agroécosystèmes dans le temps et dans l'espace, de la parcelle au paysage ;
- accroître les interactions biologiques et les synergies entre les composants de la biodiversité, favorisant ainsi les processus et services écologiques clés et limitant le recours aux intrants.

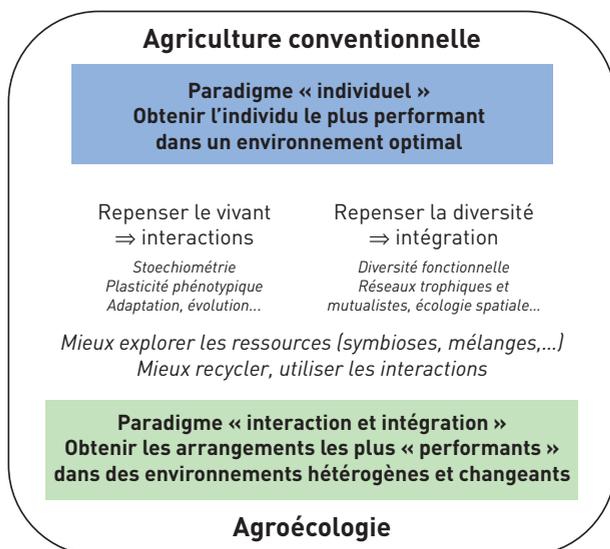


Figure 2

Les enjeux et paradigmes de l'agriculture conventionnelle et de l'agroécologie. Des exemples de concepts à mobiliser et d'actions à favoriser pour passer de l'un à l'autre sont indiqués en italiques (modifié d'après Caquet et al., 2020⁶).

VARIÉTÉS DE PLANTES CULTIVÉES, DE QUOI PARLE-T-ON ?

Lorsqu'ils décrivent la biodiversité des plantes, les botanistes utilisent en général le niveau de l'espèce, défini classiquement comme correspondant à un groupe de plantes qui ne peuvent se reproduire qu'entre elles. Depuis les travaux du naturaliste suédois Carl von Linné au XVIII^e siècle, chaque espèce animale ou végétale est désignée par un binôme (dérivé du latin ou du grec) combinant le nom de genre suivi du nom de l'espèce et complété par le nom (ou les noms) du descripteur de l'espèce (abrégé en L. quand il s'agit de Linné lui-même). Par exemple *Zea mays* L. pour le maïs ou *Solanum tuberosum* L. pour la pomme de terre.

La variété est un rang de classification inférieur à celui de l'espèce. En agriculture, elle correspond à une population de plantes d'une espèce qui a été sélectionnée et cultivée pour des caractères répondant aux besoins des hommes, et cela parfois depuis des siècles, voire des millénaires. Les variétés ont des structures génétiques différentes, plus ou moins homogènes, selon le mode de reproduction de l'espèce, la méthode de sélection et l'effet positif de l'hybridation parfois observé, par exemple lorsque deux variétés sont croisées (on parle de vigueur hybride liée à l'hétérosis)¹.

Certains noms de variétés sont bien connus des consommateurs. C'est par exemple le cas pour les variétés de pomme de terre Bintje et Belle de Fontenay, inscrites depuis 1935 au catalogue français des variétés.

Afin de garantir aux utilisateurs l'identité de la variété et pour faciliter le travail des utilisateurs et des transformateurs avec des productions de qualité régulière, des systèmes très structurés ont été mis en place dans la plupart des pays au cours du XX^e siècle et le terme de variété est aujourd'hui défini dans la Convention de l'Union internationale pour la protection des obtentions végétales (UPOV) comme : « *un ensemble végétal d'un taxon botanique du rang le plus bas connu qui, qu'il réponde ou non pleinement aux conditions pour l'octroi d'un droit d'obtenteur, peut être : défini par l'expression des caractères résultant d'un certain génotype ou d'une certaine combinaison de génotypes ; distingué de tout autre ensemble végétal par l'expression d'au moins un desdits caractères ; et considéré comme une entité eu égard à son aptitude à être reproduit conforme.* » En France, chaque nouvelle variété est inscrite par décision du ministre en charge de l'Agriculture, publiée au Journal officiel. Le ministère s'appuie sur les avis d'un comité consultatif, le Comité Technique Permanent de la Sélection (CTPS²). Le catalogue français répertorie actuellement plus de 6 000 variétés (plus de 4 000 pour les espèces agricoles, plus de 2 000 pour les espèces potagères).

¹ <https://www.geves.fr/informations-toutes-espèces/quest-ce-qu'une-variete/>

² <https://www.geves.fr/qui-sommes-nous/ctps/>

Même si beaucoup de connaissances sont déjà disponibles et mobilisables, des recherches sont toujours nécessaires pour agir aux différents niveaux d'organisation de la biodiversité (génétique, spécifique, écosystémique) et à différentes échelles spatiales (de la parcelle au paysage). Il s'agit bien sûr de la biodiversité des espèces cultivées et élevées (aussi parfois appelée « biodiversité planifiée » ou « agrobiodiversité ») mais aussi des espèces associées

(aussi parfois appelée « biodiversité non planifiée »), qu'il s'agisse de micro-organismes, d'espèces d'auxiliaires⁹ ou bien encore de ce que l'on appelle les infrastructures écologiques (haies, bandes enherbées, etc.).

⁹ Les auxiliaires sont des organismes utiles aux plantes cultivées, soit en tant que prédateurs ou parasites des bioagresseurs des cultures, soit en tant que pollinisateurs indispensables à la fécondation de nombreuses espèces.

Un autre enjeu est de pouvoir mieux utiliser la biodiversité et les régulations biologiques positives pour l'agriculture (contrôle de bioagresseurs, pollinisation, fixation symbiotique de l'azote¹⁰, etc.) afin d'accroître la flexibilité et la résilience des systèmes agricoles et de développer des pratiques innovantes en connaissant mieux les interactions biologiques et écologiques pour mieux les exploiter.

4 La diversité comme atout

4.1. Utiliser les effets positifs de la diversité génétique intraspécifique

Au sein d'une même espèce végétale (ou animale), tous les génotypes ne présentent pas

10. L'essentiel de l'azote présent dans les sols résulte d'un processus biologique qui conduit à la transformation du N₂ atmosphérique, inerte, en une forme réactive, l'ammoniac. La réaction correspondante est catalysée par une enzyme, la nitrogénase. De nombreux organismes appartenant aux archées, aux bactéries et aux cyanobactéries synthétisent la nitrogénase et ont la possibilité de fixer de l'azote, en association ou non avec des plantes. Lorsque ces micro-organismes sont associés à des plantes, on parle de fixation symbiotique. L'énergie nécessaire à la réaction est fournie par la plante hôte. L'association symbiotique la mieux connue est la symbiose rhizobienne chez les plantes de la famille des Fabaceae (couramment appelées légumineuses : luzerne, pois...). Ces plantes accueillent des bactéries des genres *Rhizobium* et *Bradyrhizobium* dans des structures symbiotiques visibles à l'œil nu sur le système racinaire, appelées nodules ou nodosités.

les mêmes réponses lorsqu'on les place dans des conditions identiques, qu'il s'agisse de vitesse de croissance, de rendement, de sensibilité aux maladies, de tolérance aux fortes ou faibles températures, de vulnérabilité à la sécheresse, etc.

Les systèmes de production traditionnels sont généralement basés sur une forte diversité d'espèces et de variétés à l'intérieur de la parcelle. À l'inverse, l'intensification agricole a conduit à la généralisation des cultures pures dans lesquelles le peuplement n'est plus une communauté mais est constitué d'une seule variété. Cette intensification, en standardisant et optimisant les performances variétales et les conduites culturales, a permis d'importants gains de productivité, mais avec des conséquences non négligeables sur l'environnement.

Associer des génotypes/variétés différentes d'une même espèce de plante dans une même parcelle présente divers intérêts agronomiques, dont une meilleure valorisation des ressources conduisant à une meilleure productivité et qualité et une meilleure gestion des risques d'accident, notamment face aux bioagresseurs, conduisant à une plus grande stabilité des productions. Il existe en effet divers exemples qui montrent les **effets positifs de la diversité génétique** sur la stabilité de la production de biomasse et la résistance à la sécheresse, sur l'abondance des espèces composant un mélange cultivé, sur la régulation des maladies voire, sur l'abondance des bactéries et champignons du sol.

LE PARADOXE APPARENT DU « RIZ ÉTERNEL »

La riziculture conduite dans les terrasses du YuanYang en Chine (sud-est du Yunnan) constitue un exemple emblématique d'agrosystème durable basé sur l'utilisation d'une biodiversité cultivée élevée. Dans cette région, les rizières en terrasse procurent la principale source de subsistance pour la population locale. Une remarquable diversité du riz est maintenue au sein de ces agroécosystèmes qui existent depuis plus de 1300 ans. Dans cette région, les rendements sont corrects (5-7 t/ha), sans utilisation d'engrais de synthèse ni de produits phytosanitaires. Le riz est étonnamment préservé des épidémies, notamment celles liées à un champignon agent de la pyriculariose du riz, *Magnaporthe oryzae*, pourtant présent. Ce paradoxe apparent a été résolu en analysant plus précisément la biodiversité locale du riz. Deux sous-espèces de riz sont co-cultivées dans la zone, du riz ordinaire (*Oryza sativa indica*) et du riz gluant utilisé pendant les fêtes (*Oryza sativa japonica*), alors qu'ailleurs dans le monde, ces deux sous-espèces sont rarement trouvées dans les mêmes systèmes. D'autre part, le nombre de variétés traditionnelles (majoritairement de type *indica*) est remarquablement élevé avec jusqu'à 140 variétés différentes recensées. Or, les analyses ont montré que les variétés *japonica* présentent une forte immunité basale et peu de gènes de résistance au champignon, tandis qu'à l'inverse, les variétés *indica* possèdent une faible immunité basale et beaucoup de gènes de résistance. Ces deux types de variétés de riz ayant des systèmes immunitaires différents ont conduit à l'existence de deux populations spécialisées de champignons capables d'infecter des variétés spécifiques de riz. Ces deux types d'agents pathogènes ultra-spécialisés sont donc incapables de se disperser dans un paysage hétérogène. Les populations de champignons sont contraintes à être généralistes, ce qui empêche l'émergence de génotypes spécialistes très agressifs et limite les dégâts sur le riz.



Crédit photo : E. Fournier, INRAE

Plus proche de nous, un autre exemple d'utilisation réussie d'un mélange de variétés au sein d'une même espèce est celui du colza. En semant un mélange composé à 5 % d'une variété très précoce et à 95 % d'une variété à précocité « normale », il est possible d'attirer sur les plantes de la variété précoce un insecte ravageur, le mélégièthe, qui mange les boutons floraux et fait son unique cycle annuel sur ces plantes. Ceci évite les attaques sur les plantes de l'autre variété et permet d'éviter un traitement insecticide. Les co-bénéfices sont une meilleure protection des utilisateurs de produits

phytosanitaires, des auxiliaires et des pollinisateurs, notamment les abeilles.

4.2. Associer les espèces

L'un des axes importants des recherches en appui à la transition agroécologique est la **mise en place de peuplements composés de plusieurs espèces dans les parcelles cultivées** plutôt que de peuplements monospécifiques. La culture d'associations d'espèces végétales est une pratique répandue dans de nombreuses régions du globe, notamment en zone intertropicale. Elle repose

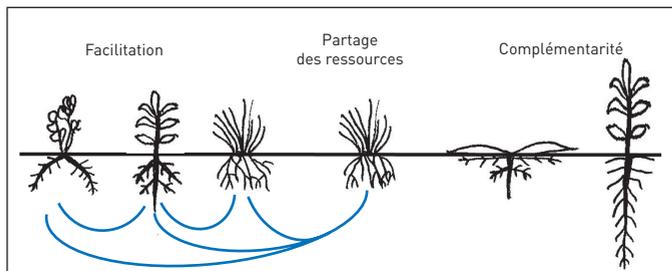


Figure 3

Représentation schématique des situations d'interactions favorables entre espèces végétales (voir texte pour plus de détails ; modifié d'après Brooker et al., 2015¹¹).

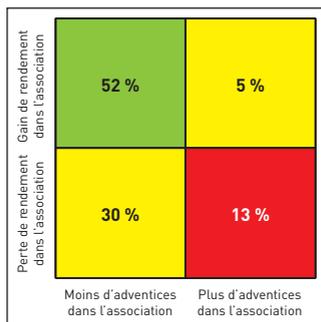


Figure 4

Bilan de l'analyse de 34 études portant sur des associations entre des cultures principales (maïs, blé, etc. ; 15 espèces) et des légumineuses (trèfle, luzerne, etc. ; 26 espèces) selon deux types de réponses : biomasse des adventices et rendement de la culture principale. Dans 82 % des cas, un effet positif de l'association sur la biomasse des adventices a été observé. De même, un effet positif sur le rendement de la culture principale a été observé dans 57 % des cas. Dans 52 % des cas, des effets positifs ont été observés pour les 2 réponses (d'après les données de Verret et al., 2017¹²).

sur la mise à profit, souvent sur la base de connaissances empiriques, de certaines interactions entre espèces, bien connues en écologie (Figure 3) :

- complémentarité de niche entre espèces, pour des espèces qui exploitent des formes différentes d'une même ressource (azote par exemple) ou bien qui utilisent une même ressource mais de façon différée dans le temps ou dans l'espace ;

- facilitation entre espèces dans les situations où une espèce augmente la croissance ou la survie de l'espèce qui lui est associée à travers l'amélioration des conditions environnementales (température, ombre, disponibilité des ressources...). Ceci peut découler d'interactions directes entre plantes ou d'interactions indirectes *via* les communautés microbiennes et mycorhizes présentes dans le sol.

En valorisant la complémentarité et les interactions positives entre espèces cultivées en association, des gains

peuvent être observés sur les rendements ou d'autres critères comme l'abondance des adventices par exemple (Figure 4).

Les développements en ce sens concernent aussi les situations où une culture dite « de rente » (car ses produits sont commercialisés) est associée, pendant tout ou une partie de son cycle, à une ou d'autres espèces de plantes qui ne sont pas récoltées. On parle alors de plantes compagnes. Plusieurs types d'associations peuvent être distingués : semis simultané avec la culture de rente, la plante compagne mourant ou étant détruite avant récolte de la culture principale ; association relais, où une espèce (ou un mélange) est semée en cours de cycle de la culture de rente, le bénéfice attendu étant principalement pour la culture suivante ; associations (semi) permanentes, avec semis direct de la culture de rente dans un couvert (semi)permanent non récolté.

Au sein des associations du premier type, un intérêt particulier est apporté aux plantes de service, qui sont à même de fournir différents services aux plantes cultivées : couverture du sol et contrôle des adventices, fixation symbiotique de l'azote atmosphérique qui est ensuite restitué à la mort de la plante de service (par exemple suite à un épisode de gel), contrôle des bioagresseurs

11. Brooker et al., 2015. Improving intercropping : a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytol.*, **206**, 107-117. <https://doi.org/10.1111/nph.13132>

12. Verret V. et al., 2017. Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. *Field Crops Res.*, **204**, 158-168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.010>

(plantes pièges, plantes émettant des substances répulsives, etc.), favorisation des auxiliaires des cultures. La gestion et le pilotage de ces interactions biologiques sont délicats, afin de capitaliser sur la complémentarité des espèces sans que leurs croissances respectives ne soient pénalisées.

Parmi les exemples figure notamment celui du colza d'hiver (**Figure 5**) avec lequel on peut semer des légumineuses conduites seules (lentille fourragère, féverole, vesce commune...) ou en mélange (lentille-féverole par exemple). Les résultats d'essais menés dans différentes régions de France montrent que cette technique permet de réduire l'usage d'engrais azotés ainsi que d'herbicides et d'insecticides, sans pénaliser le rendement du colza.

Pour une part, les recherches sur les plantes de services font intervenir les concepts et méthodes de l'écologie chimique. Il s'agit notamment d'identifier les molécules et les mécanismes par lesquels certaines plantes attirent – ou au contraire – repoussent les bioagresseurs, de caractériser leurs cibles, voire, de rechercher des voies de synthèse d'analogues susceptibles d'être utilisés dans des démarches de lutte contre les bioagresseurs par confusion olfactive (attractants ou au contraire répulsifs).

4.3. Revisiter les pratiques traditionnelles pour s'en inspirer et les démultiplier

Les agricultures tropicales sont une source d'inspiration

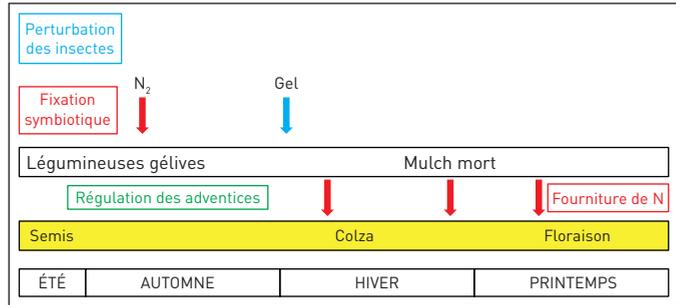


Figure 5

Représentation schématique de l'utilisation de plantes de service gélives (légumineuses) sur les cultures de colza d'hiver. Le mélange perturbe la détection des plants de colza par les insectes ravageurs par confusion visuelle ou olfactive. La couverture du sol par les légumineuses empêche le développement des plantes. Grâce à leurs nodosités racinaires, les légumineuses fixent le diazote atmosphérique. Elles gèlent en hiver mais pas le colza. Les plantes tuées par le gel forment une couche de végétaux morts (mulch mort). En se décomposant, elles libèrent de l'azote qui peut alors être utilisé par le colza.

pour l'agroécologie. Les « jardins créoles » sont des systèmes traditionnels, notamment aux Antilles, qui regroupent plus d'une dizaine d'espèces sur une petite surface (100 à 200 m²) pour une autoconsommation diversifiée (tubercules, légumes, épices et arbres, ainsi que des animaux). Systèmes agroécologiques par nature, ils font l'objet de recherches menées en collaboration avec les agriculteurs pour définir des références techniques et économiques, concevoir et mettre en œuvre des innovations, tester leur impact sur les performances agroécologiques et la fourniture de services écosystémiques. C'est notamment le cas en Guadeloupe dans le cadre de projets coordonnés par INRAE¹³.

13. <https://www.inrae.fr/actualites/microfermes-guadeloupe-transition-agroecologique-route>

5 Transition agroécologique et paysages

Le paysage agricole est une mosaïque de parcelles et d'espaces interstitiels, de tailles, de formes et d'arrangements variables dans l'espace, mais aussi dans le temps, au rythme des successions culturales, des activités agricoles et de l'aménagement du territoire. Ces arrangements sont liés aux contraintes des exploitations agricoles en relation avec leur mode de production, aux caractéristiques du milieu en relation avec la distribution des sols et des nappes, mais aussi aux activités non agricoles, en particulier aux interfaces entre espaces cultivés et non cultivés. Ces mosaïques, liées aux dimensions socio-économiques du territoire, s'inscrivent dans une histoire et sont porteuses d'enjeux pour la société en matière de production et d'environnement¹⁴.

De nombreuses espèces d'auxiliaires des cultures (pollinisateurs, carabes, etc.) mais surtout de bioagresseurs sont mobiles dans le paysage. L'analyse des résultats obtenus dans les programmes de recherche montre clairement que des paysages agricoles simples, c'est-à-dire très homogènes en termes de cultures et pauvres en éléments semi-naturels (haies, petits bois, etc.) sont plus sensibles aux épidémies et aux infestations

14. Gascuel-Odoux C., Magda D., 2015. Gérer les paysages et les territoires pour la transition agroécologique. *Innovations Agronomiques*, **43**, 95-106. <https://www.inrae.fr/ciag/content/download/5601/42531/file/Vol43-10-Gascuel-Odoux.pdf>

d'organismes nuisibles aux cultures et qu'ils abritent en revanche moins d'auxiliaires (*Figure 6*). La proportion d'habitats semi-naturels, la diversité des couverts cultivés mais aussi les caractéristiques de leur gestion agricole (niveau de pression phytosanitaire, régime de travail du sol) sont autant de facteurs qui interagissent de façon complexe pour déterminer l'intensité du contrôle biologique¹⁵.

Des analyses récentes réalisées à grande échelle en Europe et au Canada mettent en évidence **le rôle positif de la taille des parcelles et de la présence des habitats semi-naturels sur la biodiversité d'espèces aériennes** (plantes, abeilles, papillons, syrphes, carabes, araignées, oiseaux)¹⁶. Une méta-analyse de plus de 5 000 études réalisées dans le monde entier montre que l'augmentation de la diversité des cultures est le plus souvent favorable à la fertilité du sol, au rendement des cultures, aux cycles des nutriments, à la séquestration du carbone, au biocontrôle et à la régulation du cycle de l'eau¹⁷ (*Figure 7*).

15. Petit S., Lescourret F., 2019. La biodiversité au cœur des agro-écosystèmes : où en sommes-nous aujourd'hui ? *Innovations Agronomiques* **75**, 15-27 dx.doi.org/10.15454/pidx5t

16. Sirami C. *et al.*, 2019. Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **166**, 16442-16447. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906419116>

17. Tamburini G. *et al.*, 2020. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, **6**. DOI : 10.1126/sciadv.aba1715

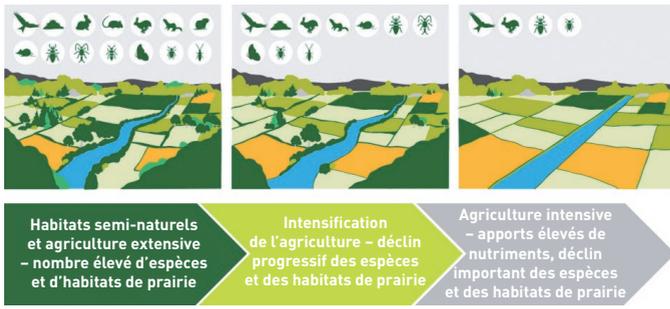


Figure 6

Biodiversité des zones agricoles et intensité de l'utilisation des terres.
 Source : Cour des comptes européenne, 2020, Rapport spécial - Biodiversité des terres agricoles : la contribution de la PAC n'a pas permis d'enrayer le déclin ; https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR20_13/SR_Biodiversity_on_farmland_FR.pdf.

La mise en place et la gestion de fonctions écologiques à l'échelle des paysages impliquent une mobilisation collective des acteurs si l'on souhaite progresser dans la conception et la gestion de paysages qui supportent des fonctions multiples : régulation des bioagresseurs (ravageurs, adventices, maladies) ou de la pollinisation ; maintien de la biodiversité des sols et en surface ; maintien de la production végétale et animale (fertilité des sols, nutrition animale) ; gestion des espèces envahissantes ; etc.

Les priorités pour la recherche sont multiples. Il s'agit tout d'abord de repenser l'organisation spatiale des parcelles, des ateliers de production, des espaces interstitiels, des infrastructures écologiques pour améliorer les régulations écologiques (préservation des habitats, des auxiliaires des cultures, des pollinisateurs, ...) et biogéochimiques (sols, flux d'eau et de matière, ...).

Il est aussi nécessaire de changer le point de vue, pour passer

de la parcelle et de la gestion à court terme (le plus souvent à l'échelle annuelle) à une vision spatialisée et pluriannuelle des activités agricoles dans un territoire. Ceci permet d'identifier de nouveaux leviers de performance environnementale et économique, y compris au travers d'un renforcement des interactions entre productions animales et végétales¹⁸.

Enfin, parce que l'échelle du paysage est capitale pour la réussite de la transition agroécologique, il est indispensable d'élaborer des projets de territoire et de gestion collective des activités agricoles à cette échelle. Le paysage ne doit plus être une mosaïque résultant d'actions individuelles non concertées mais le fruit de coopérations entre acteurs au sein

18. Caquet T., Gascuel-Oudou C., Peyraud J.-L., 2020. Priorités de la recherche : les apports des Ateliers de Réflexion Prospective interdisciplinaire Agroécologie et Élevages pour demain d'INRAE. *Innovations Agronomiques*, **80**, 1-12. <https://doi.org/10.15454/mw8h-0x21>

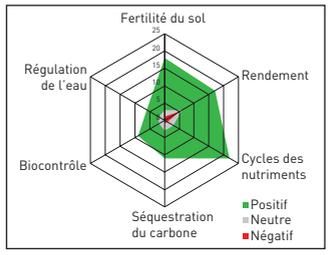


Figure 7

Nombre d'études ayant mis en évidence un effet positif, neutre ou négatif de la diversification des cultures sur 6 services écosystémiques (d'après les données de Tamburini et al., 2020¹⁵).

d'espaces partagés et qui bénéficient d'outils d'accompagnement pour faciliter la réflexion et le pilotage des actions.

6 Mobiliser l'ensemble de la chaîne de valeur

6.1. Vers de nouvelles filières agro-alimentaires

La diversification des productions qu'implique l'agro-écologie s'accompagne d'une augmentation de la variabilité et de l'hétérogénéité des produits alors que les filières agro-alimentaires se sont organisées pour favoriser la standardisation des matières premières ainsi que des processus de transformation. Valoriser la diversité passe notamment par une adaptation des procédés mis en œuvre dans le cadre des industries agro-alimentaires (traitement physique et/ou chimique, bioprocédés, etc.) mais aussi par une redéfinition de la chaîne logistique (méthodes de séparation et de tri, collecte, stockage, transport...). Les entreprises du secteur doivent aussi se poser la question d'une **évolution de la conception des usines agro-alimentaires vers des unités de plus petite échelle**, flexibles et pilotées en temps réel, éventuellement d'une réduction de la taille des ateliers et de leur relocalisation au plus près des sites de production. Cela nécessite d'éco-concevoir des chaînes de production capables d'intégrer des échelles plus petites tout en restant éco-efficientes (diminution des consommations d'eau ou d'énergie,

diminution des pertes et utilisation optimisée des co-produits), et garantissant bien sûr la sécurité des aliments¹⁹.

Les acteurs de la recherche et de la recherche et développement se mobilisent pour développer des innovations pour : évaluer la durabilité des pratiques agroécologiques ; mieux caractériser les produits agricoles correspondants (qualité nutritionnelle, aptitude à la transformation, etc.) ; analyser les comportements des consommateurs (perception, consentement à payer²⁰, etc.) ; définir de nouvelles normes et standards, voire des labels ; organiser les circuits logistiques et économiques ; etc.

6.2. Un rôle clé pour le numérique et les agroéquipements

S'engager dans la transition agroécologique ne signifie pas renoncer aux bénéfices que peut apporter la technologie. Le numérique et les agroéquipements peuvent et doivent jouer un rôle dans cette transition en contribuant à informer ou à contrôler les processus qui sont mobilisés par l'agroécologie :

- rendre visibles et intégrer la réalité et les mécanismes déclencheurs de stimulation

19. <https://qualiment.fr/votre-partenaire-de-recherche-pour-linnovation-en-alimentation/focus-areas/vers-une-usine-agro-alimentaire-intelligente/>

20. Le consentement à payer correspond à la valeur maximale du prix d'un bien ou d'un service donné que le consommateur/acheteur potentiel accepte de payer du fait des propriétés de ce bien ou de ce service.

des défenses internes des plantes ou des animaux ;

- quantifier les régulations naturelles ;
- évaluer l'occupation des niches écologiques et leur préservation ;
- tirer profit de la valorisation des complémentarités entre organismes pour réduire la compétition et créer des synergies ;
- reconstituer les stocks de nutriments et maintenir les paramètres de l'environnement dans une gamme de fonctionnement qui respecte les particularités locales de l'environnement et ses potentialités, mobilisant pour ce faire le bouclage des cycles à travers la valorisation de la biomasse, mais aussi le recyclage, la sobriété et l'efficacité des ressources mobilisées.

Cela conduit au développement et à la mise en œuvre de nouveaux capteurs et équipements (y compris des robots) au niveau des exploitations agricoles pour la caractérisation de l'environnement et des organismes, pour le désherbage ou la récolte (par exemple, moissonneuses pour cultures mélangées, trieurs de graines). Des innovations numériques sont aussi mobilisées pour permettre la traçabilité des pratiques et des produits (blockchain²¹) et pour le partage

21. Une blockchain est un registre, une grande base de données qui a la particularité d'être partagée simultanément avec tous ses utilisateurs, tous également détenteurs de ce registre, et qui ont également tous la capacité d'y inscrire des données, selon des règles spécifiques fixées par un protocole informatique très bien sécurisé grâce à la cryptographie. <http://www2.assemblee-nationale.fr/15/missions-d-information/missions-d-information-communes/>

d'informations entre acteurs, y compris à une échelle internationale²².

6.3. Les agriculteurs au cœur de la transition

La transition agroécologique des exploitations agricoles est en elle-même un objet pour la recherche car elle se déroule dans un contexte de pressions multiples (économiques, climatiques mais aussi sociales) sur les agriculteurs et d'incertitude sur la stratégie et les actions à mettre en œuvre. Dans certains cas, les agriculteurs savent qu'ils ne peuvent plus continuer à l'identique, sans pour autant savoir comment agir autrement. La mise en œuvre de l'agroécologie nécessite de changer de mode de raisonnement car piloter les activités agricoles sur la base des processus écosystémiques est très différent du pilotage conventionnel basé sur l'utilisation d'intrants. Il n'y a pas de trajectoire unique car il est nécessaire d'adapter le système à son contexte de production, en intégrant l'incertitude (connaissances incomplètes, effet des actions...). Il en résulte que la transition agroécologique d'une exploitation agricole se raisonne localement et chemin faisant. Cela implique que l'agriculteur mobilise et développe

chaines-de-blocs. Plus concrètement, la blockchain permet à ses utilisateurs - connectés en réseau - de partager des données sans intermédiaire.

22. Par exemple, plateforme des connaissances sur l'agroécologie de la FAO, <https://www.fao.org/agroecology/home/fr/> ; plateforme collaborative pour la transition agroécologique AGRISOURCE, <https://www.agrisource.org/fr/1/accueil.html>

ses capacités d'apprentissage pour des pratiques mal connues et en rupture. L'expérience montre l'intérêt de participer pour cela à des collectifs ou des groupes d'échanges, accompagnés ou non de conseillers et/ou d'animateurs, qui facilitent la créativité, l'apprentissage, la réassurance face aux incertitudes, la construction de nouveaux référentiels d'action, mais aussi la réflexivité et l'appropriation de nouvelles valeurs.

7 Des co-bénéfices pour la résilience vis-à-vis du changement climatique

Face aux risques climatiques (et à leurs impacts sur le système alimentaire dans son ensemble), les systèmes de production doivent devenir plus résilients. Des retours d'expérience suggèrent que plusieurs des leviers mobilisés par la transition agroécologique (diversification, amélioration des sols, partage d'expérience...) sont favorables à la résilience des systèmes agricoles vis-à-vis des chocs induits par le changement climatique, en permettant de réduire leur sensibilité et leur vulnérabilité tout en augmentant leur capacité d'adaptation, avec des co-bénéfices pour l'atténuation du changement climatique (**Figure 8**)²³.

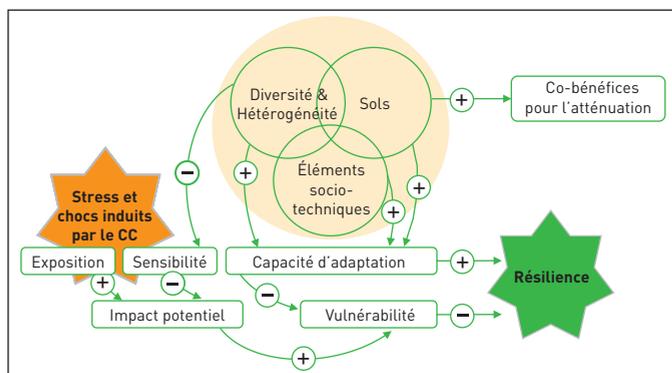


Figure 8

Relations entre pratiques agroécologiques, sensibilité/vulnérabilité aux stress induits par le changement climatique et résilience des systèmes agricoles (adapté d'après Leippert et al., 2020²²).

23. Leippert F., Darmaun M., Bernoux M., Mphesha M. 2020. The potential of agroecology to build climate-resilient livelihoods and food systems. Rome. FAO and Biovision. <https://doi.org/10.4060/cb0438en>

Changer d'échelle pour réussir la transition

Même si beaucoup de progrès ont été réalisés, il est nécessaire de poursuivre les efforts engagés, à la fois dans le domaine de la reconception des systèmes agricoles et pour permettre le changement d'échelle de l'agroécologie, c'est-à-dire de permettre une vraie transition massive des pratiques agricoles.

En termes de reconception, il convient de s'appuyer sur l'ensemble des connaissances dispo-

nibles (y compris les connaissances locales et traditionnelles) pour développer et déployer des solutions basées sur les besoins des agriculteurs. Il est aussi nécessaire d'approfondir la connaissance des processus écologiques (par exemple, rôle de l'olfaction chez les insectes ravageurs, interactions chimiques entre plantes, etc.) et de travailler à la meilleure manière de les mobiliser comme des facteurs de production agricole et de résilience. Bien entendu, la mise en œuvre des nouvelles pratiques implique d'améliorer en continu les techniques et outils mobilisables à différentes échelles spatiales ou d'organisation socio-économique.

Changer d'échelle implique de renforcer les capacités des acteurs par la formation, tant initiale que continue, de favoriser le partage d'expériences (ce qui marche ... et ce qui ne marche pas) et les recherches collaboratives, notamment au travers de démarche d'innovation ouverte dans des « *living labs*²⁴ ». Il convient aussi de rappeler que la transition ne concerne pas que la phase de production mais qu'elle doit mobiliser l'ensemble des filières et des chaînes de valeur jusqu'aux consommateurs. Enfin, il sera aussi nécessaire d'adapter les cadres institutionnels et réglementaires. Le défi est de taille, mais c'est l'affaire de tous que de le relever.

24. Les « *living labs* » ou « laboratoires vivants » sont le support d'une démarche d'innovation participative incluant les utilisateurs. Ils visent à répondre à des problématiques complexes et multidisciplinaires à l'échelle d'un territoire. Dans un « *living lab* », toutes les parties prenantes sont impliquées dans le processus de cocréation et l'utilisateur (particuliers, entreprises, collectivités) est placé en position centrale.

