



QUELLES TECHNOLOGIES POUR UNE AGRICULTURE BAS CARBONE, RÉSILIENTE ET PROSPÈRE ?

PLANIFIER UN DÉPLOIEMENT MESURÉ

RAPPORT FINAL - NOVEMBRE 2024

DANS LE CADRE DU
PLAN DE TRANSFORMATION
DE L'ÉCONOMIE FRANÇAISE



Avant-propos

L'association **The Shift Project** travaille depuis 14 ans à éclairer les chemins de la décarbonation de nombreux secteurs économiques : transports, bâtiment, industrie ou encore numérique. Cependant, nous avons – trop – longtemps négligé de nous intéresser à la question du vivant et de la biomasse. **Ce document, centré sur les technologies agricoles, vient compléter le travail du Shift Project sur le secteur agricole.**

The Shift Project cherche à explorer des voies pragmatiques et sécurisées au regard de la transformation des secteurs économiques qu'il étudie. Très souvent, **les secteurs intègrent des leviers technologiques dans les trajectoires qu'ils explorent.** Le secteur agricole n'y fait pas figure d'exception. Ces leviers, aux niveaux de maturité et de déploiement variables, peuvent également dissimuler des effets rebonds nécessitant d'être correctement identifiés pour s'en prémunir.

Ainsi, **ce rapport accompagne la publication du rapport "Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère", qui aborde la question de la transformation du secteur de la production agricole dans son ensemble.** The Shift Project a fait le choix de lancer un groupe de travail sur la question de la place de l'innovation technologique dans la transformation du secteur pour instruire plus précisément cette problématique qui est, pour le secteur agricole tout particulièrement, urgente et incontournable. Les réflexions de ce groupe de travail ayant été très fructueuses, le choix a été fait d'en synthétiser les résultats dans un rapport dédié.

Ce rapport propose de prendre du recul sur la capacité des technologies à accompagner le secteur agricole dans sa transition. **Ce document s'attache en premier lieu à proposer une méthode pour décrypter les technologies agricoles. Ce chapitre s'inscrit pleinement dans le rapport "Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère"**¹ publié en parallèle en ce sens que des leviers technologiques y sont parfois proposés ou au moins mentionnés. Ces éléments de méthode sont exemplifiés au travers de plusieurs cas d'étude technologiques, choisis pour couvrir un spectre assez large d'enjeux. Nous invitons les acteurs agricoles (production, conseil, financements, etc.) à s'en inspirer pour explorer des trajectoires technologiques sur les systèmes agricoles de leur territoire, et accompagner leur développement de manière éclairée.

Par souci de lisibilité et de longueur de rapport, toutes les technologies agricoles étudiées ne seront pas détaillées de la même façon. Les lectrices et lecteurs intéressés pourront fouiller les [annexes](#) proposées pour découvrir les cas d'études technologiques considérés dans ce travail. Ce rapport a ainsi pour vocation d'apporter des éléments méthodologiques permettant d'éclairer les réflexions qui doivent avoir lieu sur la place de l'innovation technologique dans la transformation du secteur agricole.

Le rapport est découpé en quatre parties distinctes.

La première section propose une cartographie large des réponses technologiques associées aux enjeux de décarbonation et d'adaptation de l'agriculture. A notre connaissance, ce panorama est le premier exercice du genre.

Dans la deuxième partie du rapport, un pas de côté est proposé pour dégager des premiers freins à lever (dépendances, verrouillages, etc.) au regard d'un possible déploiement des technologies agricoles.

La troisième section propose une méthodologie pour décrypter les technologies dans leur capacité à accompagner une transition du secteur agricole, en identifiant notamment leur domaine de pertinence et les problèmes à éviter. Avec une vision à 360°, des matrices d'enjeux et de leviers sont compilées pour donner à voir la diversité des questions liées à l'atterrissage de technologies agricoles dans les fermes. Des profils types d'agriculteurs et d'agricultrices sont invoqués de manière à projeter les réponses technologiques

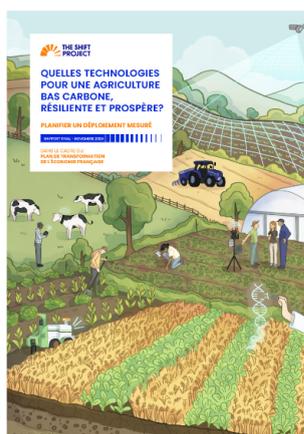
¹ Rapport "Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère", The Shift Project, Novembre 2024

choisies dans des cadres plus concrets. L'objectif n'est en rien de mettre les exploitants agricoles dans des cases mais bien de discuter de l'adéquation entre les technologies agricoles et la réalité des systèmes agricoles dans toute leur diversité.

La dernière section de cette note invite à penser plus largement les conditions de mise en œuvre des technologies agricoles.

La publication de ce rapport est également accompagnée de celle du rapport “Quels actifs avec quelles compétences pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère en 2050 ?”², fruit d'un autre groupe de travail, qui s'est tenu en parallèle et qui vise à mettre en évidence l'importance, dans le cadre de l'indispensable planification de la transformation du secteur agricole, de dessiner les trajectoires d'emploi et les enjeux de formation qui devront accompagner son évolution.

Une Grande Consultation des Agriculteurs (ci-après la “GCA”) a également été menée avec l'aide des Shifters, réseau des bénévoles du Shift, et fait l'objet d'un rapport dédié. Elle a permis aux agriculteurs, premiers concernés par la transition de leur secteur, de partager leurs préoccupations et leurs attentes vis-à-vis de la transition agroécologique, ainsi que la réalité concrète de leur quotidien professionnel, tant dans leur perception du risque climatique que dans l'évolution de leurs pratiques. Un premier volet qualitatif fondé sur des entretiens avec 68 agriculteurs et une enquête quantitative ayant concerné plus de 7 700 agriculteurs ont ainsi largement alimenté nos travaux. Cette consultation a également permis de faire remonter des considérations liées à l'emploi (les aspirations des agriculteurs notamment) et aux compétences.



² The Shift Project, Rapport “Quels actifs avec quelles compétences pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère en 2050 ?”, Novembre 2024

À propos du think tank The Shift Project

The Shift Project est un groupe de réflexion qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. **Association loi 1901 reconnue d'intérêt général** et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, sa mission est d'éclairer et d'influencer le débat sur la transition énergétique et climatique en Europe.

The Shift Project constitue des groupes de travail autour des enjeux les plus décisifs de la transition, produit des analyses robustes et chiffrées sur ces enjeux et élabore des propositions rigoureuses et innovantes. Il mène des campagnes d'influence pour promouvoir les recommandations de ses groupes de travail auprès des décideurs politiques et économiques. Il organise également des événements qui favorisent les discussions entre parties prenantes et bâtit des partenariats avec des organisations professionnelles et académiques, en France et à l'étranger.

The Shift Project a été fondé en 2010 par plusieurs personnalités du monde de l'entreprise ayant une expérience de l'associatif et du public. Il est soutenu par plusieurs grandes entreprises françaises et européennes ainsi que par des organismes publics, des associations d'entreprises et, depuis 2020, par des PME et des particuliers.

Depuis sa création, **The Shift Project a initié plus de 50 projets d'étude**, participé à l'émergence de manifestations internationales et organisé plusieurs centaines de colloques, forums, ateliers et conférences. Il a pu influencer significativement plusieurs débats publics et décisions politiques importantes pour la transition énergétique, en France et au sein de l'Union européenne.

L'ambition du Shift Project est de **mobiliser les entreprises, les pouvoirs publics et les corps intermédiaires sur les risques et opportunités de transformation découlant de la « double contrainte carbone »** que constituent le changement climatique d'une part et les tensions sur l'approvisionnement en énergie d'autre part. Sa démarche est marquée par un prisme d'analyse particulier, fondé sur la conviction que l'énergie est un facteur de développement de premier ordre : dès lors, les risques induits par le changement climatique, intimement liés à l'usage de l'énergie, relèvent d'une complexité systémique et transdisciplinaire particulière. Les enjeux climat-énergie conditionnent l'avenir de l'humanité ; il est donc nécessaire d'intégrer cette dimension le plus rapidement possible à notre modèle de société.

Il est épaulé par un réseau de **dizaines de milliers de bénévoles** regroupés au sein d'une association loi 1901, **les Shifters**, créée en 2014 pour apporter un soutien bénévole au Shift Project. Initialement conçu comme une structure permettant d'accueillir toute personne souhaitant aider le Shift par un travail de recherche, de relais ou de soutien, les Shifters réalisent de plus en plus de travaux indépendants, mais toujours avec un objectif : contribuer efficacement à la sortie des énergies fossiles à l'échelle française et européenne.

Comité de rédaction

Les auteurs

Corentin Leroux, Pilote du Groupe de travail « Technologies agricoles », Aspexit



Corentin Leroux est agronome de formation. Après un doctorat en contrat CIFRE autour du traitement de données spatiales en agriculture, il monte son entreprise Aspexit³ en 2019 pour accompagner les acteurs du monde agricole à l'usage des outils numériques. Corentin rédige des dossiers de vulgarisation autour de thèmes mêlant agronomie, technologies numériques, climat et énergie. Avec Alexandre Touraine, il a lancé en 2024 une plateforme collaborative pour recenser les outils numériques utilisables en agriculture⁴. Corentin a travaillé pour The Shift Project dans le cadre du projet régional "Vers des économies régionales bas-carbone"⁵ sur la partie Agro-Industrie et dans le cadre du projet Agriculture avec ce rapport sur les technologies agricoles. Corentin est également fortement engagé dans l'association bénévole des Shifters depuis 2019.

Relecteurs

Céline Corpel, Cheffe de projet Agriculture, The Shift Project
Corentin Biarreau-Noyers, Ingénieur projet Agriculture, The Shift Project
Laure Le Quéré, Ingénieur projet experte, The Shift Project
Thomas Robert, Chargé de projet Agriculture, The Shift Project
Clémence Vorreux, Coordinatrice Agriculture, The Shift Project

Ce projet a aussi reçu l'appui d'Emma Stokking et de Corentin Grange pour la communication.

Remerciements

Des réunions hebdomadaires d'1h30 ont eu lieu sur la période décembre 2023 - juin 2024. L'ensemble des participants n'est pas nommé ici pour des raisons de confidentialité. Des séances flash de travail (ateliers présentiels, visio-conférences, appels téléphoniques) ont également eu lieu en parallèle avec d'autres acteurs du secteur.

The Shift Project et Corentin Leroux tiennent à remercier l'ensemble des participant.e.s pour la richesse des échanges et le temps bénévole hebdomadaire accordé à la réalisation de ce travail.

Nota bene : les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport intermédiaire ne peuvent être attribuées ni aux contributeurs, ni aux relecteurs cités ci-dessous. Le contenu de ce rapport n'engage que The Shift Project.

³ Site internet d'Aspexit, <https://www.aspexit.com/prestations-agriculture-et-numerique/>

⁴ Site de WAT, La plateforme participative de 1552 Outils Numériques pour Agriculteurs, <https://www.wiki-agri-tech.com/>

⁵ Rapport "Vers des économies régionales bas-carbone", The Shift Project, septembre 2024, <https://theshiftproject.org/article/verb-rapport-final/>

L'équipe Agriculture du Shift Project remercie les partenaires du projet :



Table des matières

AVANT-PROPOS	1
À propos du think tank The Shift Project	2
Comité de rédaction	3
Remerciements	3
Table des matières	4
Table des figures	7
Table des tableaux	8
Liste des abréviations	9
QU'ENTEND-T-ON PAR TECHNOLOGIE AGRICOLE ?	10
UN PANORAMA DES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES EN AGRICULTURE	12
1. Méthodologie de construction de la cartographie des technologies	12
2. Une hétérogénéité importante des technologies agricoles selon les filières	18
3. Sélection des innovations technologiques	21
DES PREMIERS VEROUS À LEVER	23
1. Des dépendances multiples et des possibilités de verrouillage technologique	24
2. Mesurer l'impact environnemental des technologies agricoles	25
3. Un faux sentiment d'impartialité des technologies agricoles	27
COMMENT ÉVALUER LES TECHNOLOGIES AGRICOLES ?	29
1. Proposition méthodologique d'explicitation des technologies agricoles	29
A. Cartographier les enjeux des technologies agricoles et les leviers d'action pour accompagner la transition agricole	29
B. Projeter les technologies agricoles dans les fermes	31
2. Étape 1 : évaluation de deux innovations technologiques	32
A. L'exemple de l'optimisation des apports azotés	32
B. L'exemple des nouvelles technologies génomiques	35
3. Étape 2 : Projection de deux innovations technologiques dans les fermes agricoles	38
A. L'exemple de la robotique électrique de désherbage sélectif	39
B. L'exemple de la sélection conventionnelle	44
PENSER LES CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE DES TECHNOLOGIES AGRICOLES	50
1. Un besoin de méthode pour analyser les technologies agricoles	50
2. Réfléchir aux orientations technologiques des systèmes agricoles	51
A. Des technologies à penser au service de scénarios de transition plus large : l'exemple du travail du Shift Project	51
B. Combiner les technologies agricoles et coupler les formes d'innovation	54
C. Adopter un principe de sobriété pour les technologies agricoles	55
D. Adopter une culture du principe de précaution pour limiter les risques	56
3. Cultiver l'hétérogénéité	58
A. Outiller l'ensemble des systèmes agricoles et ne pas rechercher la standardisation	58
B. De la nécessité d'un raisonnement multi-échelles	59
4. Projeter les compétences et emplois à venir	60
A. De nouvelles compétences à développer	60
B. Favoriser les croisements interdisciplinaires	61

C. L'adoption des technologies agricoles dans les fermes	61
CONCLUSION GÉNÉRALE	63
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	64
ANNEXES	67
Annexe 1 : Compléments sur la méthodologie de construction du panorama des technologies	67
Annexe 2 : Matrices d'enjeux et Matrices des leviers associés aux innovations technologiques	67
A. Sélection conventionnelle	67
B. Agro-équipement paysan de désherbage mécanique	70
C. Robotique électrique de désherbage sélectif	73
D. Optimisation de l'alimentation animale	75
E. Production en environnement contrôlé	77
F. Suivi numérique de ravageurs à l'échelle territoriale	79

Table des figures

Figure 1 : Méthodologie de décryptage des technologies agricoles

28

Table des tableaux

Tableau 1 : Innovations technologiques en production végétale

15

Tableau 2 : Innovations technologiques en production animale

16

Tableau 3 : Catégorisation des innovations technologiques sélectionnées suivant un lot de critères.

21

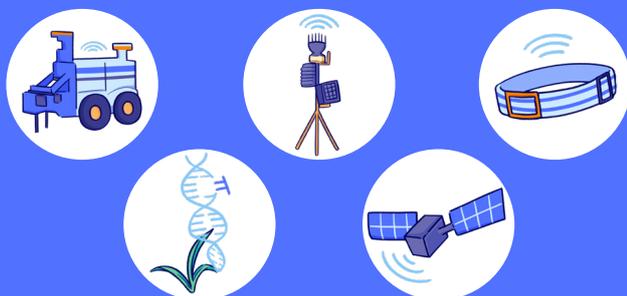
Tableau 4 : Analyse détaillée de l'implantation d'outils robotiques de désherbage sélectif dans les fermes

40

Liste des abréviations

AB	Agriculture biologique
ACV	Analyse en Cycle de Vie
eqCO ₂	équivalent CO ₂
CUMA	Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole
ETA	Entreprise de Travaux Agricoles
GES	Gaz à Effet de Serre
GPS	Global Positioning System
NTG	Nouvelles technologies génomiques
OGM	Organisme Génétiquement Modifié
PTEF	Plan de Transformation de l'Économie Française
R&D	Recherche et Développement
RTK	Real Time Kinematic
SAM	Sélection assistée par marqueurs
UV	Ultraviolets

QUELLES TECHNOLOGIES POUR UNE AGRICULTURE BAS CARBONE, RÉSILIENTE ET PROSPÈRE ?



UNE GRANDE DIVERSITÉ DE TECHNOLOGIES AGRICOLES

- Toutes les technologies ne sont pas comparables (en termes de maturité, déploiement, adoption, etc.)
- Toutes les filières agricoles ne sont pas outillées au même niveau

PREMIERS POINTS D'ATTENTION



Des risques de dépendance et de verrouillage technologique



Les technologies ont une empreinte environnementale



Les technologies ne sont pas neutres, elles influencent la nature des usages

IL Y A UN BESOIN DE MÉTHODE POUR ANALYSER LES TECHNOLOGIES AGRICOLES

L'évaluation doit être **systematique** (pour chaque technologie, chaque cas particulier, chaque application donnée, etc.) et **exhaustive** (en prenant en compte les impacts directs et les impacts indirects et systémiques).

1



CARTOGRAPHIE DES ENJEUX ET LEVIERS D'ACTION

- Évaluation des relations technologiques : dépendances et synergies entre technologies
- Enjeux 360° de déploiement des technologies : agronomique, technique, réglementaires, financiers, etc
- Leviers d'actions pour exploiter les forces et opportunités, et limiter les faiblesses et menaces du déploiement

2



PROJECTION DES TECHNOLOGIES DANS LES FERMES

- Adéquation de la technologie avec le système agricole : structure et taille de l'exploitation, localisation de l'exploitation, pratiques agricoles, réglementation et encadrement technique
- Utilisation de profils types d'agriculteurs pour montrer la diversité des trajectoires technologiques

PENSER LES CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE DES TECHNOLOGIES AGRICOLES



Cultiver l'hétérogénéité en outillant l'ensemble des systèmes agricoles et en ne recherchant pas la standardisation



Adopter un principe de sobriété (individuelle, collective, structurelle) pour les technologies agricoles



Adopter une culture du principe de précaution pour limiter les risques (infrastructurels, flux physiques, organisationnels, socio-économiques, etc.)



Penser multi-échelles en s'inscrivant dans les dynamiques et trajectoires locales et en questionnant les enjeux parcelles – ferme – filières – territoires



Coupler les systèmes d'innovations (technologiques, agronomiques, organisationnels, etc.)

Qu'entend-t-on par technologie agricole ?

Qu'est-ce que la technologie ? **Il serait hasardeux d'en proposer une définition unique tant cette notion dépend des disciplines, des contextes et des usages.** Elle est en vérité directement liée aux utilisateurs. Le terme "technologie" a souvent pris le pas sur le terme "technique". Au départ présenté comme un « discours sur les techniques », la technologie, par le biais d'un anglicisme (technology), s'est retrouvé à évoquer des techniques souvent modernes et complexes. La technologie est maintenant très souvent utilisée en lien avec le champ lexical de l'innovation. Il n'est donc pas rare d'entendre parler de nouvelles technologies, ou encore de technologies du futur.

Il faut garder néanmoins à l'esprit qu'**une innovation n'est pas nécessairement technologique**⁶. Les innovations peuvent prendre des formes très variées : innovations de produits, innovations de procédés, innovations organisationnelles, innovations de marketing... Même s'il devrait être admis qu'une innovation est l'atterrissage ou la démocratisation d'une invention sur le terrain, nous utiliserons le terme d'innovation dans un sens relativement élargi, recoupant donc à la fois les notions d'innovation et d'invention.

Il a été souvent question d'intégrer la notion de pratiques agricoles dans le périmètre de ce travail. Pour éviter atterrissements et échanges à rallonge, il a été considéré que, sauf rares exceptions, **les technologies agricoles n'étaient pas décarbonantes ou adaptatives en tant que telles mais qu'elles étaient là pour accompagner des pratiques agricoles qui elles, l'étaient.** Les pratiques agricoles ne sont donc pas ici considérées comme des technologies agricoles. Ces pratiques agricoles sont abordées plus largement dans le rapport "Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère" du Shift Project.

Nous insistons fortement sur le fait que cette note se concentre sur les innovations technologiques et non pas sur l'ensemble des très nombreuses innovations possibles du secteur agricole. Nous sommes conscients que des innovations agronomiques (relay-cropping, semis direct sous couvert, associations de cultures et plantes compagnes, insertion de dispositifs agroforestiers, ...), ou encore organisationnelles (circuits d'approvisionnements, mutualisation d'outils via des organisations collectives, etc.) sont autant d'ouvertures possibles vers des transitions agroécologiques. Les innovations technologiques pourront soutenir ces innovations « non-technologiques » au travers de couplage d'innovations, nous y reviendrons dans ce rapport.

Nous retiendrons pour ce rapport une définition large des technologies agricoles. Elles seront considérées comme un **ensemble de techniques modernes, plus ou moins complexes, en relation avec des technologies déjà existantes.** Aux technologies sophistiquées, nous n'opposons pas la sophistication de l'utilisation de technologies moins complexes – chacune pouvant avoir sa place dans des trajectoires agricoles variées. Les échanges autour des technologies doivent considérer non seulement la technologie en tant que technique au sens traditionnel du terme mais aussi la manière d'utiliser la technologie en ce sens que la technologie doit s'intégrer dans un processus de production agricole.

Entre le rapport "Agriculture 2025" (Bournigal et al., 2015) et le triptyque maintenant régulièrement entendu de la bouche du président Macron ⁷« Numérique, Génétique, Robotique », **le périmètre des technologies agricoles est très large. Nous l'avons volontairement contraint aux technologies en lien avec l'atténuation et l'adaptation au dérèglement climatique** (nous en reparlerons plus loin).

⁶ OCDE (2018). Manuel d'Oslo. https://www.oecd.org/fr/publications/2018/10/oslo-manual-2018_g1g9373b.html

⁷ Discours du Président de la République à l'occasion de la présentation du Plan France 2030, <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2021/10/12/presentation-du-plan-france-2030>

Le financement des technologies AgriTech et Biotech⁸ sous forme de projets d'équipements prioritaires de recherche (PEPR) et d'appels à manifestation d'intérêts (AMI) dans le cadre du plan France 2030 ou encore de financements de projets européens (Horizon Europe) est loin d'être négligeable. Ces technologies, pour beaucoup, nécessitent un temps long de recherche et des investissements conséquents pour arriver à maturité. **Dans le contexte actuel de budget contraint, il importe donc d'identifier pleinement les enjeux qu'elles soulèvent afin d'opérer des arbitrages éclairés, et de définir des politiques publiques adéquates.**

Une lecture rapide de plusieurs rapports et plans agricoles, français et européens (Plan stratégique nationale de la PAC, Stratégie Farm to Fork du Green Deal Européen, le rôle de l'intelligence artificielle dans le Green Deal, le rapport d'orientation de la FNSEA face au défi climatique...) montre qu'une majorité évoque, dans une plus ou moins grande mesure, le recours à des technologies dans la transition énergie-climat de l'agriculture. **Force est néanmoins de constater que ces évocations sont souvent très floues.** En effet, des technologies sont parfois mentionnées, avec des niveaux de granularité assez grossiers, et sont souvent embarquées dans une terminologie plus générale d'innovation. **La capacité de ces technologies à accompagner la transition agricole est généralement admise, sans démonstration particulière, alors que la diversité des technologies agricoles est vertigineuse et que toutes sont loin d'être au même niveau de maturité.** Même si nous ne pouvons pas attendre de ces documents cadres une description fine des innovations technologiques, ce manque de clarté laisse transpirer une vision techno-solutionniste qui pèse mal les risques qui peuvent découler de choix trop peu éclairés.

⁸ Comprendre ici les technologies agricoles (AgriTech) et les biotechnologies (Biotech)

Un panorama des innovations technologiques en agriculture

Mais tout d'abord, de quoi parle-t-on ? Une cartographie de l'existant permet de donner à voir l'écosystème dans son ensemble, de créer des liens entre technologies, d'identifier les manquants, les orphelins ou les oubliés, et de ne pas réinventer la roue. Cette cartographie peut être plus ou moins fine en fonction du degré de spécialisation recherché. Nous en proposons un premier aperçu dans cette section du rapport. Le panorama de ce rapport est volontairement large pour donner à voir un ensemble varié de technologies.

1. Méthodologie de construction de la cartographie des technologies

Le panorama aurait pu être construit de multiples façons. Même si nous nous sommes inspirés d'approches de type Analyse en Cycle de Vie (ACV) ou de méthodologies récentes de labellisation carbone (Carbon Agri, Cap2er...), **nous avons préféré partir sur une matrice représentant en abscisse une classification grossière des itinéraires de production agricole, et en ordonnée une décomposition des enjeux de décarbonation et d'adaptation au dérèglement climatique (voir tableaux 1 et 2).** L'axe d'itinéraire agricole est suffisamment large pour ne pas écarter des filières ou des systèmes de culture particuliers, et suffisamment fin pour pouvoir y placer des technologies agricoles. L'axe des ordonnées expose trois macro-catégories d'enjeu : (1) la limitation des émissions des principaux gaz à effet de serre du système agricole (N_2O , CH_4 , CO_2), (2) le stockage et la limitation du déstockage du CO_2 dans les sols, et (3) l'adaptation au dérèglement climatique au sens large. La catégorie autour de l'adaptation aurait certes pu être redécoupée, mais les ramifications auraient certainement été très (trop) nombreuses.

Deux matrices ont été produites, une pour les productions végétales et une autre pour les productions animales car nous avons considéré les technologies agricoles plus proches les unes des autres à l'intérieur de ces deux grandes catégories de production qu'entre elles.

Les innovations technologiques agricoles sont affichées de deux manières principales : soit au croisement entre une entité d'un itinéraire agricole et un enjeu d'atténuation ou d'adaptation, soit à cheval sur une longue portion de l'itinéraire – toujours pour un même enjeu d'atténuation/adaptation. Il faut y comprendre que les technologies agricoles s'insèrent dans des systèmes agricoles dynamiques, avec des opérations agricoles qui s'enchaînent, et qu'il est parfois difficile d'imaginer l'action d'une technologie agricole à un seul endroit du spectre. C'est par exemple le cas des biotechnologies ou de la sélection conventionnelle qui, en proposant des semences plus ou moins améliorées et adaptées à l'environnement local, impactent en cascade l'ensemble des activités agricoles de l'itinéraire (parce qu'elles seront plus ou moins précoces, nécessiteront plus ou moins d'eau sur telle période, plus ou moins de désherbage, seront plus enclines ou non à des attaques de bio-agresseurs...).

Nous rappelons encore une fois que le périmètre des technologies invoquées ici s'arrête à la porte de la ferme. Les technologies à l'aval de l'exploitation agricole (industries agroalimentaires, distribution, consommateurs...) ne sont pas considérées ici. Nous insistons sur les interactions fortes entre pratiques agricoles et technologies agricoles. **Par honnêteté intellectuelle, il faut ici accepter que la majorité des technologies agricoles ne sont pas décarbonantes ou adaptatives en tant que telles. Elles sont plutôt là pour accompagner des pratiques agricoles qui elles, le sont.** Les technologies agricoles sur la cartographie ont un lien avec la transition énergie-climat de l'agriculture, que ce soit dans une logique d'atténuation ou d'adaptation. Ces liens peuvent être directs ou implicites, parfois indirects voire à la limite

des enjeux. Certaines technologies de surveillance ou de suivi environnemental et agronomique sont par exemple pertinentes pour générer de la connaissance (à intégrer ou non dans des modèles agronomiques), justifier la réalisation d'une pratique agricole (dans une optique d'obligations de résultats), ou servir à comparer les pratiques appliquées à l'échelle d'un territoire pour faire progresser toutes les fermes d'un territoire (*nudge* ou autres).

Des compléments sur la méthodologie de construction du panorama de technologies sont disponibles en [Annexe](#).

Les technologies agricoles en lien avec la thématique énergétique (méthanisation, petit éolien, agrivoltaïsme, décarbonation des engrais minéraux,...) n'ont pas été considérées dans le périmètre de ce travail. Elles seront traitées dans d'autres réflexions du Shift Project. L'agrivoltaïsme est seulement évoqué dans sa capacité à protéger la production agricole des effets du dérèglement climatique (ombrage, limitation du stress hydrique, etc.)

Le périmètre des technologies agricoles s'arrête à la porte de la ferme. La position du Shift Project sur une trajectoire nationale de l'agro-industrie n'est pas encore définie. Elle le sera en 2026. Le Shift Project réaffirme, en parallèle de cette note sur les technologies agricoles, une position sur le secteur de l'agriculture (voir rapport Agriculture du Shift Project).

Il est bien évidemment difficile de se centrer sur un exercice énergie-climat pour parler d'un secteur du vivant comme l'agriculture. Nous nous intéresserons autant que faire se peut aux ressources (eau, phytosanitaires, etc.) sous l'angle de la double contrainte carbone, à savoir la combinaison d'un dérèglement climatique et de ressources énergétiques en déplétion, l'utilisation de l'eau ou encore de phytosanitaires requérant de l'énergie dans leur utilisation ou leur fabrication.

Matrice des technologies pour les productions végétales

	Semer et Planter	Éviter la concurrence des autres plantes	Nourrir la plante et le sol	Protéger et Soigner la plante	Récolter et gérer la post-récolte
Adaptation au changement climatique	Sélection génétique (dont NTG, Mutagenèse, sélection conventionnelle, introduction de matériel hétérogène biologique...), Sélection sur la base de nouveaux critères (contrastes de résistance inter et intraspécifiques, résilience aux stress hydriques, ...), Géo-positionnement RTK pour schéma de cultures spécifiques (cultures associées inter et intraspécifiques), Assurances paramétriques/indicielles, Modélisation des évolutions climatiques et des futures zones de production, Production en environnement contrôlé et automatisé (serres et autres), Suivi satellitaire des infrastructures agroécologiques (dispositifs agroforestiers, bandes mellifères, mares, ...)				
	Simulateurs d'assolements et rotations, Outils numérique d'aide aux choix des couverts (notamment cultures associées incluant des légumineuses) et systèmes de culture		Scoring des pratiques agricoles, Irrigation de Précision (compteurs connectés, bilan hydrique semi-automatisés...)	Biostimulants & Réseaux mycéliens, Biocontrôle, Agrivoltaïsme, Outils de modélisation de gestion intégrée des cultures, Crow dsourcing de nouvelles maladies émergentes	
Séquestrer et limiter le déstockage de CO₂	Suivi satellitaire (cultures intermédiaires, infrastructures agroécologiques...), agro-équipement pour accompagner la mise en place de pratiques décarbonantes (semis sous couvert, cultures intermédiaires, etc).	Désherbage sélectifs (thermique, électrique, UV...), Désherbage non sélectifs appliqués de manière précise	Génétique & Exsudats racinaires, Biostimulants & Réseaux mycéliens, Biochar, Activateurs de sol, Traçabilité et certification carbone, Suivi satellitaire des restitutions des couverts végétaux et des reliquats azotés		

Limiter émissions de CO₂	Organisation et planification des chantiers de travaux agricoles (gestion de flotte et télémétrie, serious game écoconduite et autres...), Robotique légère et agro-équipement léger, Amélioration de l'efficacité des agro-équipements et outils d'aide au réglage machines (Diagnostics tracteurs, Couple-consommation, Optimisation du gonflage des pneus, Adéquation tracteur-outil, plage d'utilisation), Motorisation électrique				
					Optimisation de tournées de récolte et de la logistique en général (par imagerie satellite, par télémétrie...), Outils d'optimisation de la logistique et du stockage (capteurs environnementaux, capteurs en silo...), Capteurs environnementaux et capteurs en silo pour diminuer les pertes
Limiter émissions de N₂O	Sélection génétique avec utilisation optimale de l'azote ou sélection génétique de plantes (principalement légumineuses, efforts de recherche sur les céréales) fixatrices d'azote (dont NTG, Mutagenèse, Sélection conventionnelle, ...)				
			Modulation intra-parcellaire, Inhibiteurs de nitrification, Nano fertilisants, Modèles de pilotage intégral de l'azote, Spectrométrie des engrais organiques, Outil d'aide à la décision des fenêtres d'application d'épandage, Agro-équipement amélioré d'épandage, Biostimulants		Agroéquipements spécifiques au tri et à la valorisation des légumineuses cultivées en association (trieur optique dans les silos)

Tableau 1 : Innovations technologiques en production végétale

Matrice des innovations technologiques pour les productions animales

	Gérer la reproduction	Alimenter et Abreuver	Gérer l'état et la propreté des bâtiments	Protéger et Soigner les animaux	Collecter et Abattre
Adaptation au changement climatique	Sélection génétique de races rustiques et/ou de variétés adaptées aux stress induits par le changement climatique (ex: thermo-tolérantes), Bassins aquacoles en environnement contrôlé et automatisé (aquaponie...), Assurances paramétriques/indicielles				
		Outil d'aide au choix des couverts de prairies, outils d'aide à la récolte fourrages (météo), outils de mesure de valeur nutritionnelle du fourrage (MAT, protéines, ...)		Suivi temps réel du stress thermique des animaux	
Séquestrer et limiter le déstockage de CO₂ Limiter les émissions de CO₂		Suivi satellitaire de l'état des prairies	Capteurs et outils de suivi des consommations énergétiques sur site		
Limiter émissions de CH₄	Diagnostic CAP2ER, Sélection génétique (dont sélection conventionnelle [bas méthane, etc], NTG...)				
	Collier de vèlages pour diminuer l'âge de renouvellement	Inhibiteurs de CH ₄ entérique (additifs alimentaires, inhibiteurs chimiques, ionophores...), Modulation de la ration (alimentation de précision), Eco formulation alimentaire, Vaccin contre les micro-organismes méthanogènes, Plules robotiques pour suivi interne de la méthanogénèse, Masques à		Outils de suivi de l'état de santé des animaux d'élevage (impact de ce paramètre sur la productivité comme sur les émissions de méthane)	

		méthane, Génétique de l'holobionte, Diminution de la part de lipides insaturés dans les rations			
Limiter émissions de N₂O					
		Ecoformulation alimentaire, Modulation de la ration (alimentation de précision), Alimentation multiphase, augmentation de l'usage d'acides aminés dans l'alimentation biphasé, utilisation de matières premières extrudées dans la formulation	Couverture des fosses, Évacuation directe des lisiers, Lavage d'air, Brumisation		

Tableau 2 : Innovations technologiques en production animale

2. Une hétérogénéité importante des technologies agricoles selon les filières

La diversité des innovations technologiques proposées peut surprendre. D'un côté, **cette abondance témoigne du fait qu'il n'existe pas (et n'existera certainement pas) de technologies miracles en agriculture tant les systèmes agricoles sont différents les uns des autres.** C'est bien une multitude de réponses technologiques qui viendra appuyer le secteur agricole dans sa transformation. De l'autre, **ce panorama montre que de nombreuses technologies existent** – certes dans un état de maturité hétérogène – et qu'une partie est déjà active sur le terrain agricole, en expérimentation ou en conditions opérationnelles.

La répartition des technologies agricoles sur le panorama révèle également les portions du spectre qui sont assez largement investiguées (sujettes à innovation technologique), et celles qui sont un peu plus laissées de côté. L'absence de technologies à certains croisements d'itinéraires agricoles et d'enjeux de transition n'est pas toujours surprenante. Les relations entre l'évitement de concurrence entre les plantes et le stockage de carbone (ou la limitation de son déstockage) ne sont par exemple pas évidentes à trouver.

En complément de ces orientations technologiques se pose également la question de l'échelle de travail ou d'impact de ces technologies. La majorité des technologies agricoles existantes ont tendance à s'appliquer à l'échelle de la ferme voire de la parcelle agricole. Des échelles plus larges de type filière, bassin versant, territoire ou paysage sont souvent manquantes de ce panorama technologique et indiquent parfois un réel manque de recul sur la thématique par les acteurs de l'innovation. S'il est indubitable que certains leviers de décarbonation et d'adaptation sont activables à l'échelle de chaque ferme, **il est évident que certains changements systémiques dépassent largement l'échelle de l'entreprise individuelle.** Des technologies intégrées sur l'ensemble d'une chaîne de valeur (sur une filière complète) peuvent être une façon d'accompagner un changement profond, au risque bien sûr de soumettre la filière à des nouvelles contraintes ou verrouillages qu'il sera nécessaire d'anticiper. Ces technologies ne sont toutefois pas faciles à mettre en œuvre car les besoins des acteurs qui gravitent autour des agricultrices et agriculteurs peuvent être à géométrie variable.

Plus particulièrement en production végétale :

L'empreinte CO₂ venant principalement du carburant utilisé par les machines au champ, il n'est pas très surprenant que la majorité des innovations technologiques s'intéressent ici à l'agro-équipement. Les outils d'aide au réglage machines et de diagnostics tracteurs (couple-consommation, adéquation tracteur-outil, plage d'utilisation) permettent d'envisager une diminution des consommations. L'économie de carburant intervient aussi au travers de tailles de machines plus réduites (par exemple de la robotique légère) et de toutes les technologies pour optimiser les déplacements et tournées en tout genre. La substitution d'énergies fossiles pour la motorisation des machines joue également un rôle important. Nous l'évoquons simplement ici au travers de la motorisation électrique. Nous rappelons que les questions énergétiques (méthanisation, cultures énergétiques...) ne sont pas traitées dans ce rapport.

L’empreinte de la fertilisation azotée dans le bilan de gaz à effet de serre de l’agriculture est maintenant bien documentée. **Les technologies agricoles se sont ainsi très largement orientées vers une réduction des émissions liées à la fertilisation.** On y retrouve des technologies d’optimisation des apports d’azote pour augmenter l’efficacité de l’utilisation de l’azote via des préconisations plus fine des besoins azotés ou via des agro-équipements plus sophistiqués (modulation intra-parcellaire, enfouissement des apports...). D’autres technologies se concentrent sur une réduction directe des émissions d’azote du sol (inhibiteurs de nitrification, nano-fertilisants...). Ces dernières peuvent être aussi potentialisées grâce aux efforts de sélection de variétés qui utilisent mieux l’azote disponible.

Les technologies agricoles pour augmenter le stockage de CO₂ ou en limiter son déstockage sont finalement assez présentes dans le panorama (en nombre) même si leur utilisation est peut-être un peu plus limitée au regard des autres innovations technologiques. On retrouve ici dans un premier temps les outils de suivi de pratiques stockantes de carbone (par imagerie satellitaire ou autre) comme les implantations de couverts végétaux (en vérifiant s’ils sont implantés ou non – ou en mesurant des niveaux de biomasse restitués) ou le non-travail du sol (même si la pratique ne fait pas l’unanimité en terme de déstockage de carbone). Ces technologies agricoles interviennent alors ici sous une logique d’obligations de résultats (en utilisant la technologie pour prouver ou justifier la mise en place de pratiques agroécologiques). On placera ici aussi les agro-équipements qui permettent à ces pratiques stockantes de carbone de passer à l’échelle. Apparaissent également toutes les technologies liées à des apports au sol avec des effets plus ou moins directs sur la séquestration : activateurs de sol, développement des réseaux mycéliens (en particulier mycorhiziens) par biostimulation, l’apport de biochar (par pyrolyse de la biomasse végétale). Sont présentes également toutes les technologies liées à la certification carbone (crédits carbonés, primes filières) qui peuvent faire appel à de l’outillage numérique pour de la remontée ou de la traçabilité de données filières.

Une partie des technologies d’appui à l’adaptation couvre l’ensemble de l’itinéraire agricole, contrairement aux technologies d’atténuation plutôt centrées sur un pan de l’itinéraire (même si ce pourrait être sujet à discussions pour quelques technologies). Cette présence diffuse pour certaines technologies s’explique par le fait qu’elles sont des systèmes de production à part entière (les technologies de production en environnement contrôlés type serre [voir un des cas d’étude technologiques abordé plus loin]), qu’elles impactent en cascade l’ensemble de l’itinéraire une fois qu’elles sont mises en place (les outils de sélection et d’amélioration génétiques peuvent jouer sur toutes les opérations culturales en suivant), ou qu’elles peuvent être utilisées à n’importe quel moment du cycle de production (par exemple les technologies d’assurances climatiques classiques ou paramétriques⁹). N’ayant défini qu’une seule grande macro-catégorie d’adaptation au dérèglement climatique, nous avons également positionné plusieurs autres technologies en lien avec l’appui au semis (les outils d’aide à la décision à l’assolement ou au choix variétal, notamment sur les mélanges intraspécifiques), tous les outils liés à la gestion de l’eau (irrigation de précision, réutilisation des eaux usées traitées, etc.) et ceux à la protection des cultures en cas de dérèglement climatique exacerbé (biostimulation et biofortification pour augmenter la résistance des plantes, agrivoltisme pour protéger contre les effets de stress thermique...).

Plus particulièrement en production animale :

⁹https://www.aspexit.com/lassurance-climatique-agricole-en-pleine-reforme/#Assurance_Numerique_Lassurance_in_dicielle_ou_parametrique

La grande majorité des technologies agricoles s'oriente sur la réduction des émissions de méthane entérique dans l'objectif de réduire l'empreinte des productions polygastriques par tonne de produit alimentaire (par poids vif, par litre de lait...). Ces technologies jouent généralement sur l'alimentation, que ce soit sur le contenu (additifs alimentaires considérés comme anti méthanogènes, éco-formulation des procédés ou approvisionnements alimentaires, part des lipides insaturés dans la ration) ou sur la quantité apportée (modulation de la ration). Certaines technologies présentées un peu plus en amont de l'itinéraire de production comme les colliers de vèlages ou les outils de détection de chaleur peuvent être utilisées pour réduire l'âge du premier vèlage et optimiser les taux de renouvellement du cheptel, participant ainsi au global à une réduction de l'empreinte unitaire de la production animale.

Dans la mesure où la génétique joue un rôle non négligeable dans la variabilité des émissions de méthane des animaux, les technologies de sélection génétique (bas méthane par exemple) sont une option pour réduire l'empreinte des systèmes d'élevage. Les réductions sont néanmoins à attendre dans un horizon de moyen terme (à partir de 2030)¹⁰.

Comme discuté en introduction, **nous retrouvons ici relativement peu de technologies adaptées à des systèmes de polyculture-élevage, d'élevage à l'herbe ou d'élevage agro-pastoraux**. Les technologies de suivi de la biomasse ou de pratiques agroécologiques (infrastructures agroécologiques type haies ou autres...) présentées dans le panorama des productions végétales peuvent être adaptées pour des contextes prairiaux ou pour de la biomasse fourragère (aide au choix des couverts de prairies, suivi satellitaire de l'état des prairies, technologies d'assurance indiciaire sur l'évolution des prairies...).

Les technologies de sélection génétique au sens large déjà discutées pour accompagner l'adaptation du secteur agricole sont aussi adaptées dans un contexte animal (par exemple sélection de races rustiques et/ou thermo-tolérantes, accroissement de la diversité génétique). Certaines technologies de suivi des conditions sanitaires des animaux permettent aussi d'anticiper d'éventuels risques liés au dérèglement climatique (suivi du stress thermique par caméra, débitmètres connectés au niveau des abreuvoirs...).

¹⁰ The Shift Project 2024 - Pour une Agriculture bas carbone, résiliente et prospère

3. Sélection des innovations technologiques

Le panorama des innovations présenté dans la section précédente est trop large pour toutes les traiter dans le cadre de cette étude. Nous préférons choisir ici des technologies ou package de technologies nous permettant de mettre en évidence des questions qui nous paraissent pertinentes à discuter dans le cadre de la réflexion sur le rôle que peuvent occuper les technologies dans la transition écologique.

Nous tentons d'embrasser un échantillon large de technologies de manière à pouvoir discuter de technologies adaptées aux productions végétales et animales, de technologies jugées comme « high tech » et « low tech », de technologies utilisées à l'échelle d'une ferme agricole ou dans une logique plus étendue de paysage, territoire ou filière, ou encore de technologies relativement solitaires en contrepois de packages de solutions technologiques.

Certaines technologies choisies pourraient apparaître contradictoires entre elles (par exemple les nouvelles technologies génomiques et la sélection conventionnelle classique). Nous considérons plutôt que ces outils sont complémentaires. Il est néanmoins manifeste que toutes ces technologies ne sont pas déployées au même niveau sur le terrain. **Certaines orientations technico-économiques (polyculture-élevage, légumineuses...) n'ont pas reçu la même attention que les autres et ne sont ainsi pas outillées de la même façon.**

Nous avons recensé ici 8 innovations technologiques différentes. Encore une fois, toutes ne sont pas détaillées avec la même finesse dans la suite du rapport. Nous renvoyons les lecteurs et lectrices intéressées [aux annexes](#). La raison principale du choix de ces technologies est présentée ci-dessous.

1. **Optimisation de l'apport d'azote [AZ]** : pour montrer une combinaison de technologies (Outil d'aide à la décision [OAD] de fenêtre d'application d'épandage, modulation intra-parcellaire, modèle de pilotage intégral, forme d'azote...) sur le sujet azoté dont on connaît l'importance en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES) agricoles.
2. **Nouvelles technologies génomiques [NTG]** : pour alimenter le débat sur des technologies controversées qui offrent des promesses de développement de nouvelles cultures.
3. **Sélection conventionnelle [SC]** : pour mettre en avant des outils variés, certains s'étant modernisés et optimisés avec le marquage moléculaire à haut débit et la sélection génétique. Ce cas d'étude permet aussi de discuter de fractures existantes sur certaines filières délaissées par la sélection conventionnelle classique.
4. **Agro-équipement paysan pour désherbage mécanique [AEP]** : pour discuter de technologies sobres et frugales, en contrepois du secteur de l'agro-équipement actuel.
5. **Robotique électrique de désherbage sélectif [ROB]** : difficile de ne pas parler de robotique agricole au vu des tendances de recherches actuelles (Grand Défi Robotique¹¹ notamment). Ce cas d'étude s'intéresse à de l'outillage robotique léger alimenté par de l'énergie électrique.
6. **Optimisation de l'alimentation animale [ALIM]** : pour montrer une combinaison de technologies (Modulation de rations, Eco-formulations, Anti Méthanogènes...) sur le sujet du méthane dont on connaît l'importance en termes d'émissions de GES agricoles. Ce cas d'étude permet également d'interroger la place de la production animale et de la consommation de viande en France sous un angle nouveau.
7. **Solutions numériques collaboratives pour la gestion de ravageurs [NUM]** : pour proposer une lecture technologique en changeant d'échelle (paysage, territoire) parce que

¹¹ <https://anr.fr/Projet/A-23-GDRA-0001>

les technologies agricoles sont souvent proposées à l'échelle de la ferme. Les valeurs d'entraide et de partage devront être prépondérantes dans la transition.

8. **Production en environnement contrôlé [PEC]** : pour échanger sur des modes de production locaux souvent moins connus du grand public et parfois sujet à controverses.

Le tableau suivant présente les technologies en suivant une grille de lecture pour envisager la transition du secteur agricole. Ce tableau ne doit pas être vu comme une grille de sélection des cas d'études technologiques mais bien comme une proposition descriptive initiale de ces technologies.

Critères	Technologies (voir nomenclature ci-dessus)							
	AZ	NTG	SC	AEP	ROB	ALIM	NUM	PEC
Dédié à la décarbonation	✓	✗	✗	-	-	✓	✗	-
Dédié à l'adaptation	✗	✓	✓	✓	-	✗	✓	✓
Technologie controversée	✗	✓	✗	✗	-	✓	✗	✗
Mature et déployable	✓	-	✓	-		✓	-	✓
Peut générer des ruptures	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Capacité à avoir des données quantitatives d'impact	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓
Avec thématiques orphelines	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓
Considérée comme low-tech	✗	✗	-	✓	✗	✗	✓	✗

Tableau 3 : Catégorisation des innovations technologiques sélectionnées suivant un lot de critères.
Légende : ✓ (Oui) ; ✗ (Non) ; - (Mitigé)

Des premiers verrous à lever

Les points de vue sur la technologie, peut-être encore plus exacerbés sur le volet agricole, peuvent être très divergents. La place de la technologie en agriculture, comme dans d'autres secteurs, est trop peu mise en discussion, et **des discours manquant de nuance ("pro-techno" contre "anti-techno") se développent dans un climat de tensions et d'oppositions délétère à une dynamique favorable à la transformation sereine du secteur.** Pourtant, si chaque "camp" est convaincu que sa posture est la bonne, la réalité est que le chemin de la transition empruntera très probablement aux deux, pour permettre de mobiliser l'innovation technologique en faveur de la transition agroécologique sans compromettre le secteur dans des voies porteuses de contraintes et de dépendances supplémentaires à un secteur qui affronte déjà beaucoup.

La réflexion poursuivie dans le cadre de ce groupe de travail ne vise pas à dissuader le déploiement de solutions technologiques en agriculture. Au contraire, il invite à définir un cadre permettant de leur assurer un rôle et une place optimale au regard des objectifs poursuivis, et un développement serein et sûr. Nous pensons que des éléments de lecture généraux et des éléments de méthode pourront apaiser des discours souvent générateurs de tensions et appuyant des oppositions parfois idéologiques.

La transformation du système agricole et agroalimentaire est urgente pour répondre aux contraintes physiques comme aux défis socio-économiques. Si la piste technologique peut offrir des solutions¹²⁻¹³⁻¹⁴, elle n'est néanmoins pas la seule. Au vu de la diversité des outils technologiques discutés dans ce rapport (limitée d'ailleurs par le périmètre de ce travail), cet argument pourrait paraître simpliste dans le sens où il devrait bien exister dans ce panorama des technologies en capacité d'accompagner la transition du secteur. Néanmoins, toutes les ressources déployées dans des directions technologiques (financement, réglementation, travail humain...) sont des supports ou des appuis qui ne seront pas développés ailleurs. **Il importe donc de s'assurer d'un fléchage avisé de ces ressources afin qu'elles soutiennent tous les axes de solutions.**

Il ne fait aucun doute que de nombreuses technologies agricoles ont en effet permis des évolutions significatives pour nos sociétés. Les rendements agricoles ont atteint des niveaux spectaculaires avec l'utilisation conjointe de semences de variétés sélectionnées, de la chimie pour réduire l'impact des bioagresseurs, des apports de fertilisants azotés minéraux pour nourrir la plante, ou encore de l'agro-équipement pour optimiser le temps de travail et les efforts au champ. Les technologies agricoles ont participé à améliorer le confort de travail des agriculteurs avec des agro-équipements toujours plus ergonomiques et efficaces. Par ailleurs, les outils technologiques déjà largement déployés cherchent à améliorer l'impact environnemental des pratiques qu'ils visent à soutenir (augmentation de l'efficacité des intrants, amélioration de la productivité des agro-équipements, etc.).

Malgré tout, les apports des années passées des technologies agricoles ne peuvent pas être considérées toutes choses égales par ailleurs au vu des contraintes physiques auxquelles le secteur agricole fait face.

¹² Bournigal et al., (2015). 30 projets pour une agriculture compétitive et respectueuse de l'environnement. #AgricultureInnovation2025.

¹³ Inrae (2023). État des connaissances sur la contribution des technologies d'édition du génome à l'amélioration des plantes pour la transition agroécologique et l'adaptation au changement climatique

¹⁴ Inria – Inrae (2022). Agriculture et Numérique. Tirer le meilleur du numérique pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables.

1. Des dépendances multiples et des possibilités de verrouillage technologique

L'agriculture est déjà en grande partie dépendante des énergies fossiles, ça n'est plus à démontrer¹⁵. Pouvons-nous nous permettre de développer des propositions technologiques qui ne contribuent pas à nous émanciper de systèmes déjà assujettis aux énergies fossiles ? Deux rapports récents du Shift Project rappellent que les approvisionnements européens en pétrole et gaz sont à risque¹⁶. Nos choix technologiques seront-ils adaptés à une agriculture qui aura réussi à se transformer et se libérer de son étreinte fossile ? Y contribueront-ils ? Même s'il est vrai que nous vivons davantage une crise de l'abondance qu'une crise de la rareté, cette question n'est pas anodine. Penser les technologies résilientes dans une agriculture qui aura réussi à se transformer appelle à interroger la capacité de ces technologies à rester pertinentes dans un monde aux conditions dégradées.

Dans ce rapport, **nous parlons d'innovations technologiques et même de packages technologiques en agriculture**. Innovations tout d'abord parce que beaucoup de technologies ne sont pas encore largement diffusées dans les exploitations agricoles. Cette entrée dans les champs ou dans les corps de ferme est hétérogène¹⁷, fonction d'une multitude de facteurs historiques, sociologiques, techniques ou encore financiers¹⁸. Rajoutons également que certaines technologies pourront être adaptées à certaines situations mais délétères dans d'autres (exemple de l'agrivoltaïsme). Il importe donc que les modalités de déploiement soient bien pensées et encadrées.

Notre engagement collectif vers une (ou des) technologie(s) particulière(s), parfois à un niveau de maturité relativement faible, nous oriente dans une trajectoire dont nous ne pourrions pas nécessairement dévier (notions de verrouillage technologique¹⁹⁻²⁰⁻²¹ et de dépendance au sentier²²). Si certaines technologies peuvent effectivement accompagner la décarbonation et l'adaptation au dérèglement climatique, d'autres peuvent au contraire entraver certains itinéraires agricoles parce qu'elles contribuent directement ou indirectement à renforcer le modèle agricole dominant. **En rendant certains itinéraires agricoles tributaires de technologies, ce sont également de nouvelles dépendances** (à un constructeur, un fournisseur d'outils, ou encore à un organisme collecteur/stockeur) **qui sont susceptibles d'émerger**²³.

Sans aller jusqu'à entraver des itinéraires agroécologiques, l'utilisation de technologies agricoles pourraient amener à discuter du besoin d'adaptation de certains itinéraires pour y faire atterrir des

¹⁵ Harchaoui, S., and Chatzimpiros, P.(2018). Can Agriculture Balance Its Energy Consumption and Continue to Produce Food ? A Framework Assessing Energy Neutrality Applied to French Agriculture. Sustainability, 10

¹⁶ The Shift Project (2021). Pétrole : quels risques pour les approvisionnements de l'Europe ?

<https://theshiftproject.org/article/nouveau-rapport-approvisionnement-petrolier-europe/>

The Shift Project (2022). Gaz naturel : quels risques pour l'approvisionnement de l'UE ?

<https://theshiftproject.org/article/gaz-risques-approvisionnement-ue-rapport-shift-project/>

¹⁷ Low enberg-Deboer, James, and Bruce Erickson. 2019. "Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption." *Agronomy Journal* 111(4): 1552–69

¹⁸ Pathak, Hari Sharan, Philip Brown, and Talitha Best. 2019. "A Systematic Literature Review of the Factors Affecting the Precision Agriculture Adoption Process." *Precision Agriculture* 20(6): 1292–1316.

¹⁹ Clapp, Jennifer, and Sarah Louise Ruder. 2020. "Precision Technologies for Agriculture: Digital Farming, Gene-Edited Crops, and the Politics of Sustainability." *Global Environmental Politics* 20(3): 49–69

²⁰ Académie des technologies (2023). Avis de l'académie des technologies sur les nouvelles technologies génomiques appliquées aux plantes.

²¹ De Wit, M.M. (2021). Can agroecology and CRISPR mix? The politics of complementarity and moving toward technology sovereignty. *Agriculture and Human Values*.

²² Carolan, 2020a. "Acting like an Algorithm: Digital Farming Platforms and the Trajectories They (Need Not) Lock-In." *Agriculture and Human Values* 37(4): 1041–53

²³ Schnebelin, Éléonore, et al.. 2021. "How Digitalisation Interacts with Ecologisation? Perspectives from Actors of the French Agricultural Innovation System." *Journal of Rural Studies*.

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0743016721002205>.

technologies (réorganisation des systèmes de cultures pour faciliter le passage d'un robot, sélection génétique pour améliorer la forme de la mamelle vis-à-vis d'une traite robotisée, etc.). **La question de savoir si l'outil doit s'adapter à la pratique agricole ou si, au contraire, si la pratique doit s'adapter à l'outil, reste ouverte.**

Ici alors, **le concept de technologie appropriée**²⁴, avec le double sens de l'appropriation par l'utilisateur qui serait en mesure d'utiliser ou d'entretenir la technologie, et de l'appropriation de la technologie à l'utilisation qu'elle va avoir, nous semble très adapté.

Packages technologiques ensuite parce qu'il nous faut considérer que les **technologies sont interdépendantes et entremêlées**. Certaines technologies ont besoin d'autres voisines ou cousines pour fonctionner et déployer leur plein potentiel. Le développement de certaines technologies embarque en chaîne le développement d'autres technologies achevées. Nous parlons bien ici des technologies entre elles, mais aussi de toutes les infrastructures dont elles dépendent, infrastructures qui doivent être déployées dans un certain nombre de cas. Par exemple, rétrospectivement, la généralisation de l'utilisation des engrais azotés de synthèse n'a pu prendre son essor que parce qu'il y a eu, simultanément, des travaux sur la sélection variétale pour disposer de cultures qui valorisent au mieux cet azote, et des solutions phytosanitaires venant répondre aux effets de cette maximisation de l'azote (raccourcisseurs à pailles pour les blés afin d'éviter la verse, et favoriser l'absorption de l'azote dans les grains, par exemple). **Ces concepts d'effets rebond**²⁵ **ou d'empilement technologique dans les différents secteurs de l'économie continuent à être documentés**²⁶. **L'agriculture n'y fait pas exception.**

Au regard du temps de développement et de déploiement des technologies, ces dernières doivent maintenant nécessairement **être pensées dès l'origine – by design – pour des itinéraires agroécologiques**, afin d'être compatibles avec l'évolution souhaitée des pratiques agricoles. Manifestement, **les technologies agricoles déployées jusqu'à présent se sont concentrées sur des logiques d'optimisation des itinéraires existants** : réduction des apports d'intrants (eau, phytosanitaires, énergie...), efficacité des agro-équipements, optimisation des tournées. Il est à craindre que ces logiques d'optimisation ne suffisent pas à elles-seules à apporter une solution à long terme aux crises du système alimentaire mondial. Même s'il n'est pas impossible que les technologies agricoles se dédient à des logiques de substitution ou de reconception d'itinéraires agricoles, les exemples restent encore fragiles et parfois plus que théoriques.

2. Mesurer l'impact environnemental des technologies agricoles

Si les enjeux énergie-climat commencent à prendre place dans le débat, l'idée que les technologies agricoles sont centrales dans l'évolution des pratiques agricoles s'est rapidement imposée (principalement sous l'angle d'une optimisation, comme évoqué plus haut). Pourtant, **l'empreinte environnementale de ces technologies elles-mêmes est rarement évoquée, et très rarement mesurée ou prise en compte** (problématique qui n'est pas propre au secteur agricole). Il semble souvent considéré que les impacts inhérents aux technologies agricoles sont compensés par les bénéfices qu'elles sont censées apporter au secteur. Pourtant, l'empreinte

²⁴ Atelier Paysan (2021). Reprendre la terre aux machines. Manifeste pour une autonomie paysanne et alimentaire

²⁵ The Shift Project (2023). Planifier la décarbonation du système numérique en France.

²⁶ Fressoz (2024). Sans Transition. Une nouvelle histoire de l'énergie. Essais Ecocène.

matérielle des technologies – pensons aux outils numériques, à l'agro-équipement ou encore à la robotique, commence à être documentée²⁷⁻²⁸ et ne peut plus être négligée.

Comment penser les technologies agricoles au regard de l'atténuation et de l'adaptation au dérèglement climatique quand ce n'est pas pour ces objectifs là que les technologies ont été développées au départ ? Des difficultés méthodologiques existent quand il s'agit d'attribuer des effets de diminution des GES à une technologie spécifique. Si les outils numériques de pilotage d'engrais azotés ont par exemple été développés pour fournir des préconisations à la parcelle, peut-on réellement évaluer correctement un gain environnemental associé à ces technologies toutes choses égales par ailleurs alors que ça n'est pas nécessairement leur intention première ? Comment être capable ensuite d'extraire l'effet unitaire de la technologie au regard de l'ensemble de l'itinéraire de production ? Il est bien évidemment possible de mesurer des gains environnementaux (les données parcimonieuses de réduction ou d'adaptation effective ne sont malgré tout pas toujours disponibles) mais, même si la technologie a permis d'accompagner la mise en place d'une pratique agricole, peut-on lui allouer tout ou partie de l'impact que cette pratique aura réussi à générer ? A noter toutefois que les gains environnementaux apportés par les technologies agricoles ne peuvent être estimés que de manière relative à une situation contrefactuelle hypothétique.

Pour continuer dans le même sens, nous pourrions également nous **interroger sur ce qu'il se serait passé si la technologie n'avait pas été utilisée ou développée.** A quoi compare-t-on un itinéraire agricole empreint d'outils technologiques ? **Le choix du point de départ ou la référence** entraîne avec lui la pertinence d'un recours à une évolution technologique. Mettre en oeuvre des innovations technologiques complexes pour améliorer ou transformer des pratiques agricoles qui, à la base, pourraient déjà être optimisées est-il une réponse suffisante (par exemple en déployant des outils de pilotage précis et ciblés de l'irrigation avant de repenser des pratiques agricoles plus économes en eau) ? Les technologies agricoles visant la décarbonation ne trouvent leur sens que lorsqu'elles s'inscrivent de manière complémentaire dans le cadre d'une dynamique dans laquelle des mesures de changement de pratiques agricoles, de sobriété et d'efficacité ont déjà été explorées et activées. L'écart à combler entre l'état initial et l'état technologique est ainsi mieux caractérisé, et la pertinence du déploiement de l'outil technologique peut être correctement définie.

Pour autant qu'une technologie agricole soit jugée pertinente pour la transition agricole, il importe de **questionner son niveau de déploiement pertinent** pour réellement fournir l'intérêt que nous lui accordons. Certaines technologies agricoles sont peut-être tellement transformantes qu'une légère introduction offre déjà des avantages significatifs. D'autres, au contraire, devront vraisemblablement être poussées jusqu'au bout pour montrer un atout différenciant. Introduire ces dernières technologies impose alors de les utiliser au maximum pour s'assurer que l'investissement initial soit rentabilisé.

²⁷ Pradel, M., et al. (2022). Comparative Life Cycle Assessment of intra-row and inter-row weeding practices using autonomous robot systems in French vineyards. *Science of the Total Environment*, 838.

²⁸ Ademe (2022). Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective. Évaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques.

3. Un faux sentiment d'impartialité des technologies agricoles

Les technologies agricoles ne sont pas neutres. A l'argument du couteau généralement brandi, étant sous-entendu que tout dépendrait de la manière dont ce couteau est utilisé, il faut au contraire rappeler que toute technologie s'inscrit dans un système socio-technique déjà bien établi. Nous ne pouvons et ne devons pas dire grand-chose des formes technologiques lorsqu'elles sont extraites de leurs réseaux, pratiques, affects et discours²⁹. Les dispositifs technologiques ne sont jamais de simples objets indépendants ; ils sont toujours relationnels dans leur essence. Il est temps d'arrêter de se demander ce que sont ces technologies et plutôt de s'intéresser à ce qu'elles font, à ce qu'elles promeuvent, à ce qu'elles impliquent et dans quel système elles s'insèrent. **Les acteurs qui interviennent dans l'écosystème technologique en agriculture doivent se responsabiliser** et garder en tête qu'ils ont tous un rôle, à un moment ou un autre, dans l'atterrissage des technologies sur le terrain agricole et, par voie de fait, sur les conséquences et impacts associés, qu'elles soient positives ou négatives³⁰.

Notre vision du monde impacte la manière dont nous développons et façonnons les technologies agricoles. Ces technologies embarquent les valeurs, affects ou encore les représentations de ceux qui les ont mises au point. A titre d'exemples, les instruments de mesure ou capteurs mesurent, supervisent ou encore évaluent ce que nous voyons ou avons décidé de voir, même si nous n'avons peut-être pas encore nécessairement les outils technologiques pour mesurer ce qui aurait dû l'être. Les modèles agronomiques que nous développons participent d'une simplification du monde qui nous entoure et sont directement liés à la façon dont nous nous le représentons.

Nous pourrions aller jusqu'à parler de **fractures d'exactitude et de précision**^{31, 32} parce que les technologies ne sont pas toujours adaptées voire même pensées pour tous les itinéraires agricoles. Certains pans agricoles sont effectivement laissés en partie de côté par les technologies agricoles en ce sens qu'ils ne sont pas autant outillés que d'autres (polyculture-élevage, légumineuses, agriculture biologique, systèmes bas intrants...), pour des raisons financières, réglementaires ou encore pour des enjeux d'organisation de filières ou de débouchés. Soutenir des systèmes agricoles diversifiés demandera de mobiliser des technologies de manière équilibrée entre les filières agricoles.

Les technologies n'entrent pas dans les exploitations agricoles toutes choses égales par ailleurs. L'adoption des technologies est un processus long et progressif³³, fait parfois d'allers-retours, et qui engage très largement à la fois les agriculteurs sur le terrain mais aussi tous les acteurs de proximité (techniciens, conseillers, etc.). Ce sont autant de thématiques non techniques qu'il convient d'adresser, entre des notions d'identité au travail et de la relation portée à son travail, à la terre, aux animaux, des questions d'organisation du travail sur l'exploitation et de la relation avec de potentiels salariés, ou encore des enjeux autour des nouvelles

²⁹ Carolan, 2020. "Acting like an Algorithm: Digital Farming Platforms and the Trajectories They (Need Not) Lock-In." *Agriculture and Human Values* 37(4): 1041–53

³⁰ Flandrin, L., and Verrax, F., (2019). *Quelle éthique pour l'ingénieur ?* Editions Charles Léopold Mayer. 260p.

³¹ Stock, Ryan, and Maaz Gardezi. 2021. "Make Bloom and Let Wither: Biopolitics of Precision Agriculture at the Dawn of Surveillance Capitalism." *Geoforum* 122: 193–203.

³² Visser, O., Sippel, S. R., & Thiemann, L. (2021). Imprecision farming? Examining the (in) accuracy and risks of digital agriculture. *Journal of Rural Studies*, 86, 623-632.

³³ Pathak, Hari Sharan, Philip Brown, and Talitha Best. 2019. "A Systematic Literature Review of the Factors Affecting the Precision Agriculture Adoption Process." *Precision Agriculture* 20(6): 1292–1316

compétences à acquérir et de l'accompagnement au changement à réaliser³⁴. Nous en reparlerons dans la description des innovations technologiques.

Force est de constater que les technologies agricoles bénéficient d'un bruit médiatique important. Les récits dominants utilisent des images puissantes pour forger la perception de la société sur ce qui est actuellement en jeu³⁵. Les récits de pénurie (énergétique, alimentaire...) principalement déployés ont tendance à être racontés par rapport à la façon dont les ressources sont utilisées, justifiant d'autant plus l'utilisation d'ajustements technologiques. En permettant supposément de parer à la profonde imprévisibilité du climat, les technologies agricoles sont présentées comme salvatrices et peuvent participer à laisser planer le doute sur l'état et la fiabilité des connaissances conventionnelles et empiriques sur l'agriculture. **La propension de nos sociétés à vouloir contrôler et simplifier les productions agricoles en s'abstrayant de la complexité du vivant nous amène parfois à privilégier l'usage de la technologie à système constant plutôt que de repenser le système à l'aune des enjeux qui s'imposent à lui**³⁶. L'agriculteur innovateur, féru de technologies, est souvent célébré et mis en avant comme un acteur en avance de phase dans l'écosystème médiatique. Il est souvent opposé à son collègue plus enclin à des pratiques traditionnelles et méfiant, voire même opposé, aux innovations technologiques de son secteur, ce dernier étant plutôt perçu comme retardataire.

Ce traitement médiatique, en parallèle de dispositifs de soutiens financiers importants tournés vers l'innovation (crédits d'impôts recherche, guichets FranceAgrimer pour le renouvellement du matériel agricole, programme d'investissement d'avenir SADEA³⁷, mouvement French Agri Tech...) participe au développement d'une course à l'innovation technologique. **Cette course à l'innovation technologique génère des fractures toujours plus marquées entre des situations agricoles qui ne se comprennent plus.** Cet écart, dont le comblement est non seulement difficile pour les agricultrices et agriculteurs mais aussi pour les acteurs qui les encadrent, ne facilite pas la consolidation, le partage d'expérience, et le déploiement des technologies déjà présentes. Cette course à l'innovation rajoute également un risque supplémentaire de générer de l'empilement technologique et de l'obsolescence en ce sens que le développement et le renouvellement d'outils sont privilégiés (voir précédente section et discussions à venir sur les innovations technologiques sélectionnées). Les dispositifs financiers, encore très orientés vers l'innovation technologique et trop peu vers le transfert technologique sur le terrain (pour un déploiement et une prise en main concrète dans les fermes agricoles) accentuent toujours plus ces déséquilibres.

Il importe de garder du recul, évaluer les enjeux et réaliser des arbitrages, au risque de se retrouver dans des situations problématiques non anticipées. Quels sont les risques à déployer ou ne pas déployer une technologie agricole ? Quelles sont les forces, faiblesses, opportunités et menaces de ces choix technologiques ? Quels sont les leviers pour maximiser les opportunités et limiter les risques associés ? Voilà autant de questions que nous invitons à soulever systématiquement et pour lesquelles nous tenterons d'amener des éléments de discussion.

³⁴ Higgins, V., van der Velden, D., Bechtet, N., Bryant, M., Battersby, J., Belle, M., & Klerkx, L. (2023). Deliberative assembling: Tinkering and farmer agency in precision agriculture implementation. *Journal of Rural Studies*, 100, 103023.

³⁵ Duncan, Emily, Alesandros Glaros, Dennis Z. Ross, and Eric Nost. 2021. "New but for Whom? Discourses of Innovation in Precision Agriculture." *Agriculture and Human Values* (June). <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10244-8>.

³⁶ Caquet et al. (2020). *Agroécologie - Des recherches pour la transition des filières et des territoires*. Chapitre 6 : Contribution des agro-équipements et du numérique à l'agroécologie. Renforcer la prise en considération du vivant. Edition Quae.

37

https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/plan-de-relance/CP_20211105_Deux_strategies_acceleration_3e_revolution_agricole_alimentation_sante.pdf

Comment évaluer les technologies agricoles ?

1. Proposition méthodologique d'explicitation des technologies agricoles

L'objectif de ce rapport est d'**apporter des éléments de méthode pour passer au crible les technologies agricoles (Figure 1)**. Notre proposition méthodologique s'appuie sur deux étapes successives, suite au panorama des technologies que nous avons déjà présenté :

- Une **hauteur de vue sur les enjeux des technologies agricoles et sur les leviers d'action** à activer pour faire en sorte que les technologies outillent et accompagnent des trajectoires agroécologiques ;
- Une **projection plus concrète des technologies agricoles dans les fermes**, via des profils type d'agriculteurs et des questionnements opérationnels, pour évaluer les capacités d'appropriation technologiques sur le terrain.



Panorama des technologies agricoles

- **Etat de l'art** des technologies agricoles, en appui à la décarbonation ou adaptation du secteur



Cartographie des enjeux et leviers d'action

- **Evaluation des relations technologiques** : dépendances et synergies entre technologies
- **Enjeux 360°** de déploiement des technologies : agronomique, technique, réglementaires, financiers, etc
- **Leviers d'actions** pour exploiter les forces et opportunités, et limiter les faiblesses et menaces du déploiement



Projection des technologies dans les fermes

- **Adéquation de la technologie avec le système agricole** : Structure et taille de l'exploitation, Localisation de l'exploitation, Pratiques Agricoles, Réglementation et encadrement technique
- Utilisation de **profils types d'agriculteurs** pour montrer la diversité des trajectoires technologiques

A. Cartographier les enjeux des technologies agricoles et les leviers d'action pour accompagner la transition agricole

Pour cette première étape, la description des innovations technologiques est découpée en quatre parties :

Premièrement, nous détaillons les objectifs, indicateurs de succès et conditions de réussite de ces technologies agricoles. Quand cela est possible, parce que la littérature existe

ou parce que des hypothèses nous ont été partagées, nous rendons également visibles une évaluation quantitative de ladite technologie dans sa capacité à accompagner l'agriculture dans une atténuation de ses émissions GES et/ou dans son adaptation au changement climatique.

Deuxièmement, nous balayons rapidement les dépendances technologiques et les flux physiques (matières, énergies...) liés à chaque technologie agricole. Dans la mesure où The Shift Project prend cause pour la double contrainte carbone (impact climatique et dépendances énergétiques) et la matérialité de nos usages, nous avons souhaité mettre en avant les composants nécessaires au bon fonctionnement des technologies. La cartographie des dépendances ou tout du moins leur diagnostic permet d'anticiper de possibles crises à venir (ruptures d'approvisionnement...) et les risques portés sur l'utilisation des technologies agricoles sur le terrain.

Une troisième partie consiste à élargir le spectre de la réflexion et à poser le cadre d'un atterrissage des technologies agricoles sur le terrain.

- Une première matrice d'enjeux³⁸, matérialise des premiers éléments de constat (forces, faiblesses, opportunités, menaces). Les forces et faiblesses sont à considérer du point de vue des facteurs internes à la technologie en elle-même. Les opportunités et menaces ont trait à leur environnement au sens large. Cette matrice est tenue depuis la perspective du système français dans son ensemble, et non pas du point de vue de tel ou tel acteur spécifiquement.
- Une seconde matrice d'actions donne à voir les stratégies à mettre en place pour activer la transition en utilisant les forces de ces technologies agricoles pour exploiter les opportunités et limiter les menaces, et identifier les leviers minimisant les faiblesses et dangers potentiels de la transition. Cette deuxième matrice permet d'opérationnaliser, ou tout du moins d'engager des pistes de réflexion pour aller au-delà du constat.

Si les arbitrages du Shift Project s'intéressent plus spécifiquement au triptyque énergie / émissions / emploi, représentatif de l'approche générale du Shift Project, ces matrices couvrent un spectre de questions relativement larges : techniques, agronomiques, financières, organisationnelles, ou encore réglementaires. Ces matrices sont l'occasion d'interroger avec une vue ensemble ce qui se passerait sur les systèmes et schémas agricoles si les technologies étaient déployées à large échelle, et si elles pouvaient impacter les trajectoires d'exploitation.

Enfin, dans la mesure où les technologies s'inscrivent parfois dans des logiques d'interaction fortes, **nous cherchons à cartographier, pour chaque innovation technologique sélectionnée, les technologies agricoles du panorama qui pourraient venir s'y combiner.** Cette quatrième évaluation est légèrement différente de la seconde en ce sens qu'elle ne cherche pas à décrire les dépendances (même si deux technologies combinées peuvent devenir dépendantes l'une de l'autre) mais plutôt à expliciter le fait que si deux technologies se combinent bien, il est imaginable que le développement d'une des technologies appelle le développement de la seconde.

B. Projeter les technologies agricoles dans les fermes

Pour donner plus de concret aux descriptions technologiques précédentes, nous proposons d'interroger la mise en œuvre technologique sur le terrain au travers de

³⁸ La méthode SWOT est un outil de diagnostic pour caractériser le contexte interne (forces et faiblesses) et l'environnement externe (opportunités et menaces) d'un projet. Cette méthode est ici appliquée au déploiement des technologies agricoles.

profils type d'agriculteurs et d'agricultrices. Ces profils cherchent à représenter la diversité des filières agricoles françaises. Le panorama n'est bien évidemment pas exhaustif mais cherche à se rapprocher des exploitations agricoles françaises telles qu'elles existent en 2024, et non **dans ce à quoi les fermes agricoles françaises pourraient ressembler à un horizon 2050** .

Nous avons volontairement décidé de ne pas nous projeter dans des scénarios de transition (Afterres, TYFA, Sisae..) pour au moins deux raisons. Déjà parce qu'il reste difficile d'évaluer actuellement la part de décarbonation ou d'adaptation permise par les technologies en elles-mêmes. Ensuite parce que les résultats de prospectives pouvant être sensiblement différents et n'embarquant pas le même lot d'hypothèses, il n'était de toute façon pas évident d'en sélectionner un plutôt qu'un autre. Nous avons ainsi préféré une première approche qualitative.

Dans la mesure où l'agriculture est dynamique – les agricultrices et agriculteurs font évoluer leurs pratiques agricoles en fonction de tout un lot de critères techniques, stratégiques, financiers ou encore réglementaires – nous ne cherchons pas par ces profils types à imposer un carcan aux exploitants. **Ces profils sont poreux et les trajectoires entre profils sont bien évidemment possibles.** L'objectif est principalement d'illustrer notre propos et de mettre en exergue des tendances principales. L'agriculture est faite de multiples nuances et il est bien évident que nous pourrions largement colorer et tempérer chaque profil par une multitude de gradients. **Ce travail permet de discuter du contexte d'utilisation des technologies mais également des conditions de pertinence de cette technologie dans une logique de transition.**

Au sein de ces profils, les technologies sont discutées sous l'angle de quatre macro-critères principaux : la structure et taille de l'exploitation, la localisation de l'exploitation, les pratiques agricoles sur l'exploitation, et les réglementations et l'encadrement technique. Ces macro-critères, détaillés ensuite en sous-critères, peuvent être compris comme des sortes de facteurs d'adoption des technologies sur le terrain, étant entendu que l'adoption reste de toute façon un processus long, fait d'allers-retours, et parfois subjectif. Nous cherchons ici à interroger l'adéquation entre des profils agricoles et des technologies.

À la suite des ateliers réalisés, nous nous sommes rendus compte que la discussion autour d'une seule liste de critères paraissait plus fluide pour certaines technologies vouées à être utilisées par les agriculteurs sur le terrain comme des nouveaux outils dans leur panoplie (ex : technologies d'optimisation de l'azote, robotique électrique de désherbage sélectif..) que pour celles qui pouvaient être assez opaques pour l'utilisateur final (ex : sélection conventionnelle, nouvelles technologies génomiques, sélection assistée par marqueurs...). Ces considérations ont pu nous amener à faire parfois évoluer un peu les profils ou les critères de discussion.

Cette étape de projection permet de sortir en partie d'une analyse simpliste où les technologies sont sélectionnées et discutées individuellement, hors de leur cadre d'application. Pour les agronomes et zootechniciens qui ont forgé depuis des décennies les concepts de système de culture et de système d'élevage, c'est bien l'ensemble du système socio-technique qui doit être considéré. C'est cet ensemble qui révèle les objectifs et contraintes de pilotage de l'agriculteur dans sa situation particulière.

2. Étape 1 : évaluation de deux innovations technologiques

Par souci de simplification et parce que le rapport a une visée méthodologique, **nous ne détaillerons ici que deux innovations technologiques pour la première étape de la**

méthode que nous proposons. Nous renvoyons les lectrices et lecteurs intéressés vers les [annexes](#). L'approche pourra être redéployée pour chaque technologie agricole envisagée.

A. L'exemple de l'optimisation des apports azotés

• Description générale

Les technologies agricoles d'optimisation des apports azotés sont regroupées ici sous un périmètre élargi de package technologique dans la mesure où, bien souvent, de nombreuses briques technologiques doivent être déployées de concert pour repenser les apports de fertilisation azotée au champ. Dans le cadre des grandes cultures par exemple, on pourra retrouver, de la préconisation initiale d'apports azotés jusqu'à l'application d'épandage au champ :

- les technologies de raisonnement initial de la dose d'azote (calcul de la dose totale ou pilotage intégral des apports),
- les technologies d'ajustement de la dose prévisionnelle en sortie d'hiver,
- les technologies de pilotage de la dose de réserve en cours de saison, les technologies d'aide au réglage du matériel d'épandage,
- les technologies d'aide à la décision pour choisir les meilleures fenêtres temporelles des apports azotés en parcelle,
- les technologies en lien avec les différentes formes et formulations d'azote à appliquer.

Ces technologies ne sont pas nécessairement exhaustives et ne sont pas adaptées à toutes les filières.

Objectifs principaux : Diminution des émissions de N₂O par volatilisation de l'azote dans l'air. Diminution de la lixiviation de l'azote dans le sol. Optimisation de l'efficacité des apports d'azote.

Indicateurs de succès : Quantité d'azote apportée à l'hectare. Efficacité d'utilisation de l'azote par les plantes. Coût de la fertilisation azotée à l'hectare (toute technologie et service associé compris).

Conditions de réussite : Conditions météorologiques pendant l'application. Agro-équipement et techniques d'apport d'azote au champ. Taux de minéralisation de l'azote du sol.

Potentiel d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et/ou d'adaptation au changement climatique : Potentielle difficulté à chiffrer l'atténuation au vu de la diversité des outils disponibles³⁹ et de leur fonctionnement.

• Dépendances technologiques et flux physiques associés

La mesure de la donnée brute appelle généralement l'usage de capteurs - généralement des caméras multispectrales - embarqués sur des vecteurs de télédétection (avion, drone, satellite) ou de proxymétrie (capteurs piéton, capteur embarqué sur machine agricole). Ces capteurs requièrent des puces électroniques et autres composants électroniques pour fonctionner, et des flux de matières pour les fabriquer (un satellite nécessite par exemple un lanceur pour être amené en orbite et un segment sol pour être opéré).

³⁹

<https://www.aspexit.com/le-raisonnement-de-la-fertilisation-azotee-par-les-outils-numeriques-une-amourette-assez-fragile/>

La transformation de la donnée en information biophysique et décisionnelle au travers de modèles physiques (modèles inverses de transfert radiatif) ou de modèles simplifiés nécessite de la puissance de calcul (GPU, CPU) et de l'énergie électrique pour faire fonctionner les calculateurs, serveurs et centre de données.

La localisation des apports azotés dans les parcelles (en intra-parcellaire ou autre) fait appel à des technologies de géo-positionnement (antenne GPS ou dGPS pour de la localisation classique au mètre près, antenne RTK pour de la localisation fine au centimètre près, 24 satellites GPS, 26-38 satellites Galileo).

Le transfert d'informations (carte de préconisation azotée ou autres...) tout au long de la chaîne (cloud to machines, machines to cloud, cloud to cloud) peut faire appel à des infrastructures réseaux (réseaux cellulaires, starlink, LoRa etc.) qui dépendent d'infrastructures différentes (aux impact environnementaux différents) qui requièrent alors des infrastructures réseaux (grandes artères fibres et câbles sous marins) ou des communications satellitaires, elles-mêmes consommatrices de matière et d'énergie.

L'application de l'apport azoté depuis l'agro-équipement au champ peut faire appel, en fonction du degré de technologies envisagé, à de l'électronique embarquée pour une modulation au niveau des buses d'épandage (position ouverte ou fermée, voire même de la modulation intra-buse), des technologies de coupure de tronçons (pour fermer des blocs de buse, par exemple proche des extrémités de parcelle), des technologies de communication ISOBUS entre le tracteur et l'épandeur attelé pour contrôler finement le travail de l'épandeur. Outre le fuel nécessaire au déplacement de l'agro-équipement, ce sont également des flux de matières pour les pièces machines ou encore les rampes d'épandage utilisées pour cette opération agricole de fertilisation azotée.

Notons tout de même que cet itinéraire technologique pourrait être simplifié. Une modulation manuelle des apports azotés, c'est-à-dire en limitant les technologies de localisation et d'application d'apports, est possible. Cela demande néanmoins une compréhension des mécanismes en jeu par l'agriculteur et un temps plus important pour l'opération culturale.

● **Cartographie des enjeux associés à un déploiement des technologies d'optimisation des apports azotés**

Une matrice d'enjeux (Forces, Faiblesses, Opportunités, Menaces) des technologies d'optimisation des apports azotés est présentée ci-dessous :

FORCES	OPPORTUNITÉS
<ul style="list-style-type: none"> ● Beaucoup d'outils numériques de raisonnement de la fertilisation azotée existent déjà ● Des nouveaux modèles de pilotage intégral de l'azote sont disponibles ● Les bonnes fenêtres d'application de l'azote sont connues ● Beaucoup de références techniques sont disponibles ● Les technologies d'optimisation des 	<ul style="list-style-type: none"> ● Des aides à l'investissement existent sur du matériel agricole et outils numériques ● Certains labels et cahiers des charges (ex : HVE) peuvent demander à ce que des outils de pilotage azoté soient utilisés ● Les politiques françaises et européennes vont dans le sens d'une réduction importante de la

<p>apports azotés sont matures sur certaines filières</p>	<p>consommation de fertilisants azotés minéraux.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les acteurs de terrain déploient des offres de service en lien avec le pilotage de la fertilisation azotée. • L'augmentation et la volatilité du coût des engrais azotés peut pousser à utiliser des outils de pilotage. • Le N₂O prend une part importante dans l'empreinte de l'agriculture (29% des émissions GES directes en 2022⁴⁰)
<p style="text-align: center;">FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le système technologique complet est coûteux • Les modèles azotés sont adaptés à certaines cultures en particulier et à des peuplements monospécifiques • Le système technologique nécessite une interopérabilité forte (pour les cartes de préconisation, entre tracteurs et rampes de pulvérisation...) • Les outils de pilotage azoté sont encore peu adoptés sur le terrain (dépend des filières et cultures) • Il existe une latence temporelle parfois importante entre la demande et la réception de cartes de préconisation azotées • Sur tous les outils de pilotage de la fertilisation azotée, beaucoup d'outils ne font en réalité pas la même chose • Les outils de pilotage de l'azote sont parfois détournés pour déplaçonner les doses réglementaires d'apport d'azote 	<p style="text-align: center;">MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les technologies de pilotage azotés sont développées et soutenues seulement sur certaines filières agricoles. • Le système technologique complet de pilotage azotée peut participer à un endettement supplémentaire des agriculteurs • Les technologies de pilotage azotés, si elles ne sont disponibles que sur certaines filières et cultures, peuvent participer à renforcer le modèle agricole dominant • L'utilisation des technologies de pilotage azotée peut ralentir le développement de pratiques alternatives qui nécessiteraient moins d'apports azotés (semis direct sous couvert permanent, légumineuses et autres plantes compagnes...)

Une matrice des leviers d'action pour exploiter les forces et opportunités des technologies agricoles d'optimisation des apports azotés tout en limitant les faiblesses et menaces est présentée ci-dessous :

<p style="text-align: center;">STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS GRÂCE AUX POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Avoir différents niveaux de labellisation pour les outils de pilotage de l'azote (COMIFER) • Élargir les expérimentations avec des outils de pilotage azoté en conditions opérationnelles d'agriculteurs 	<p style="text-align: center;">STRATÉGIES DE PRÉVENTION DES MENACES GRÂCE AUX POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Développer des modèles de préconisation azotée sur des cultures plus diversifiées • Proposer des services de pilotage azoté moins technologiques (en s'assurant d'une bonne fenêtre climatique d'application d'azote, en modulant les apports avec des technologies de géo-positionnement plus légères...) • Accompagner financièrement les agriculteurs sur des outils de pilotage azoté sous obligation de résultats
<p style="text-align: center;">STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES</p>	<p style="text-align: center;">STRATÉGIES VISANT À MINIMISER LES</p>

⁴⁰ Citepa, 2024. Rapport Secten – Emissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques 1990-2023.

OPPORTUNITÉS POUR MINIMISER LES FAIBLESSES	DANGERS POTENTIELS AU CROISEMENT ENTRE FAIBLESSE ET MENACES
<ul style="list-style-type: none"> • Forcer l'interopérabilité par l'utilisation de formats standards pour les échanges de cartes de préconisation • Améliorer la logistique et service après-vente des fournisseurs de cartes de préconisation azotée • Accorder des primes aux agriculteurs qui fractionnent d'autant plus les apports d'azote que ce qui est préconisé par les modèles 	<ul style="list-style-type: none"> • Former les acteurs agricoles aux liens entre azote et agronomie • Pousser les agriculteurs à suivre l'évolution des apports azotés dans le temps sur les fermes • Séparer la vente et le conseil sur les produits azotés ou conditionner la vente à un conseil certifié • Former les acteurs agricoles sur les techniques les plus efficaces d'apports azotés

- **Combinaison de leviers technologiques**

Les technologies d'apport d'azote peuvent se combiner avec :

- des technologies de modélisation d'assolement ou de modélisation de rotations culturales pour orienter les apports azotés vers les cultures à venir
- des technologies de sélection conventionnelle optimisées et/ou NTG pour orienter les apports vers le besoin azoté de ces variétés
- des technologies d'irrigation de précision au vu des relations intimes des cycles de l'azote et de l'eau
- ...

B. L'exemple des nouvelles technologies génomiques

- **Description générale**

Les Nouvelles Technologies Génomiques (NTG, ou les acronymes anglais plus généralement utilisés de NBT – New Breeding Techniques ou NGT – New Genomic Techniques) font partie d'un ensemble d'outils pour éditer un génome de manière sélective. Ces technologies permettent d'induire des modifications ciblées sur le génome (par ajout, modification, suppression de gènes) en vue d'une recherche de traits particuliers. Cette aiguille de précision nécessite une connaissance très fine des gènes et allèles des plantes étudiées, et une capacité à faire le lien entre des allèles favorables et des traits favorables sur la plante *in fine*. Cette approche peut fortement bénéficier des connaissances inter-espèces et des travaux de recherche réalisés en amont sur des plantes modèles. Ces nouvelles technologies génomiques se distinguent, tout en complétant, d'autres technologies agricoles comme la sélection conventionnelle (voir autre cas d'étude technologique étudié), la sélection assistée par marqueur (SAM), la mutagenèse, ou encore la transgénèse.

Objectifs principaux : Adaptation des plantes au dérèglement climatique. Meilleure efficacité d'utilisation de l'eau ou de l'azote des plantes. Minimisation du travail du sol (économie de fuel). Réduction de l'usage de produits phytosanitaires (sélection de résistances à certains ravageurs/maladies). Meilleure adaptation des plantes à des contextes d'association (légumineuses ou autre espèces insérées en plantes compagnes).

Indicateurs de succès : Amélioration de la résilience aux stress dus au changement climatique. Profil des variétés développées (traits, espèces concernées). Maintien d'une grande diversité de sélectionneurs et augmentation d'espèces cultivées. Maintien d'une diversité de filières

alimentaires (conventionnelle, bio, sans OGM, etc.). Amélioration des productions végétales (meilleure digestibilité, moins de traitements chimiques post-récolte, etc.).

Conditions de réussite : Connaissance fine du génome des plantes. Traits mono- ou oligogéniques (en ce sens que les traits ou caractères doivent être influencés par un ou plusieurs gènes) pour pouvoir éditer le génome. Investissement en amont pour développer des programmes de sélection. Méthodes disponibles de régénération de cellules à partir de tissus cultivés *in vitro*. Fortes interactions entre recherche académique et recherche appliquée.

Potentiel d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et/ou d'adaptation au changement climatique : très difficile à quantifier. Dépendra de l'orientation de la sélection et du niveau de réalisation des promesses.

● **Dépendances technologiques et flux physiques associés**

Outre le développement de laboratoires de recherche et le besoin en expertise et outils de modification génomiques, les nouvelles technologies génomiques ne semblent pas aussi sensibles que les autres innovations technologiques à des flux physiques.

L'utilisation de nouvelles technologies génomiques pourrait par contre appeler à exacerber la traçabilité des productions sur l'ensemble du système alimentaire, demandant ainsi le déploiement d'infrastructures numériques étendues (identification fine des lots, base de données...) du sélectionneur jusqu'au consommateur.

● **Cartographie des enjeux associés à un déploiement des nouvelles technologies génomiques**

Une matrice d'enjeux (Forces, Faiblesses, Opportunités, Menaces) des nouvelles technologies génomiques est présentée ci-dessous :

FORCES	OPPORTUNITÉS
<ul style="list-style-type: none"> ● Les NTG sont utilisés en routine dans la recherche fondamentale ● Les NTG apportent la capacité à lier des allèles favorables avec des traits favorables (aiguille de précision) ● Les NTG offrent un potentiel de développer des variétés adaptées au dérèglement climatique et aux stress abiotiques induits ● Les NTG permettent d'acquérir de la connaissance transversale entre les espèces ● Il est théoriquement possible de reproduire les mêmes modifications avec les NTG qu'avec la sélection classique ● Les NTG sont potentiellement plus rapides que la sélection à l'échelle d'un caractère ou plusieurs en simultané mais pas forcément à l'échelle plus globale de la sélection ou pour des mutations isolées ● Les NTG offrent la capacité de produire des traits entièrement nouveaux (ou 	<ul style="list-style-type: none"> ● Une dynamique mondiale est en cours sur les NTG (mais hétérogène entre pays) ● Des retours d'expériences sont disponibles sur les OGM, de manière à ne pas reproduire les mêmes effets délétères ● Le changement climatique (et sa rapidité) augmente les attentes des technologies NTG : cristallisation au niveau de la sélection ● Les NTG permettent d'obtenir une connaissance fine du génome de certaines plantes, en perpétuelle augmentation. ● Les NTG offrent la possibilité de cumuler beaucoup de données de phénotypage et d'envirotypage face à de plus en plus de finesse de données génétiques et génotypiques. ● Les technologies d'intelligence artificielle et de modélisation de la structure des protéines peuvent soutenir le développement des NTG

nouveaux dans la variété)	
<p style="text-align: center;">FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les technologies NTG ne sont pas au pic de leur maturité technologique • Il reste difficile d'organiser la traçabilité des plantes NTG sur l'entièreté de la chaîne agri-agro (sauf si déclaration obligatoire) • Il reste difficile de connaître le potentiel optimum d'une plante dans le futur • Les connaissances du génome des plantes sont hétérogènes • Il est plus difficile de cibler des critères en lien avec le changement climatique parce que de très nombreux de gènes sont impliqués • Le développement de plantes NTG n'est pas réalisable à la ferme et demande des outils R&D développés (labo et autres) • Les NTG font courir le risque d'une maladaptation de la plante en fonction des traits développés • Les NTG demandent des travaux de R&D et des investissements financiers importants. • Les NTG peuvent conduire à des risques sanitaires potentiels liés à l'utilisation des outils de modification du génome (effets off-target et on-target, allergénicité, toxicité...). Le génome édité et toute mutation non souhaitable ou souhaitée devrait néanmoins être éliminée par rétrocroisement. • Les NTG peuvent conduire à des risques environnementaux potentiels (effets invasifs, flux de gènes, déstabilisation des écosystèmes..) 	<p style="text-align: center;">MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les NTG font porter le risque d'une brevetabilité augmentée et d'un manque d'accès étendu aux solutions (conflits potentiels en termes de transparence et de propriété intellectuelle) • Le secteur des semences risque de se concentrer d'autant plus et de réduire le nombre d'acteurs en présence • Les NTG sont actuellement tributaire des technologies développées à l'étranger • Il peut exister un risque de pénurie d'outils de modification génétique pour la R&D et l'utilisation des NTG • Les travers des productions OGM et des systèmes de vente associés pourraient se retrouver également avec l'utilisation des NTG • La R&D autour des NTG pourrait s'orienter vers des pratiques / espèces spécifiques non durables (opportunités financières ou autres) • L'acceptabilité sociale des NTG n'est pas garantie

Une matrice des leviers d'action pour exploiter les forces et opportunités des nouvelles technologies génomiques tout en limitant les faiblesses et menaces est présentée ci-dessous :

<p style="text-align: center;">STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS GRÂCE AUX POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Travailler sur la question de la non-brevetabilité, en lien avec l'expérience des OGM (concentration importante du marché aux USA) pour garantir l'accès des traits NTG à tous les obtenteurs. • Orienter le développement des NTG vers les besoins en décarbonation • Bloquer le développement des NTG vers des variétés tolérantes aux herbicides (et autres catégories de phytosanitaires) 	<p style="text-align: center;">STRATÉGIES DE PRÉVENTION DES MENACES GRÂCE AUX POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Définition d'un cadre réglementaire empêchant la vente conjuguée de NTG et pesticides, et limitant le développement des variétés tolérantes aux herbicides • Promouvoir le développement d'outils technologiques et de variété non brevetés soutenus par la puissance publique • Orienter la recherche privée et publique vers les variétés orphelines et les traits durables • Mettre en place des sièges de décision décentralisée avec gouvernance
---	--

	partagée multi-acteurs
<p>STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS POUR MINIMISER LES FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Développer la recherche fondamentale, partenariat public privé pour mieux connaître les génomes • Développer un cadre réglementaire qui permette de garantir le meilleur développement des opportunités offertes par les NTG et de maintenir un haut niveau de sécurité sanitaire et environnementale 	<p>STRATÉGIES VISANT À MINIMISER LES DANGERS POTENTIELS AU CROISEMENT ENTRE FAIBLESSE ET MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prévoir un suivi (monitoring) des effets sanitaires, environnementaux et socio-économiques des NTG • Organiser un débat large avec l'ensemble de la société sur l'opportunité d'utiliser ou non les NTG en vulgarisant le caractère de création variétale complémentaire de la sélection et domestication. • Définir un cadre réglementaire qui permette une information du consommateur • Soutenir les semences paysannes

• Combinaison de leviers technologiques

Dans la mesure où les nouvelles technologies génomiques nécessitent une connaissance fine du génome, ces outils semblent cohérents avec des technologies de bio-informatique et de génotypage à haut débit. Les relations entre le génotype et les caractères et traits des plantes appellent également à l'utilisation d'outils de phénotypage à haut débit (en laboratoires, en fermes expérimentales, et plus largement avec les grands réseaux expérimentaux capables d'intégrer les relations entre le génotype et l'environnement). La capacité des plantes éditées par les NTG à utiliser plus efficacement des ressources azotées ou en eau du milieu pourrait être mesurée avec la panoplie d'outils technologiques présentée dans le panorama en première section du rapport (technologies d'irrigation de précision, technologies d'optimisation des apports azotés...).

La capacité des nouvelles technologies génomiques à se combiner avec des outils qui peuvent sembler moins sophistiqués de sélection conventionnelle (voir autre cas d'étude technologique) dépendra des orientations données aux NTG. Ce couplage pourrait être encouragé et priorisé afin d'accélérer l'obtention de résultats à destination des agriculteurs. Il faut considérer dans ce cas précis que c'est bien le progrès génétique mesuré et quantifié qui a permis également de développer et d'améliorer la sélection conventionnelle (via catalogue) qui utilise aujourd'hui des techniques modernes avec le marquage moléculaire (SAM) et la sélection génomique.

Retours sur la première étape de la méthode : Une prise de recul sur les technologies agricoles

Cette première étape de notre méthodologie a permis d'engager le débat sur des enjeux qui dépassent des considérations uniquement technologiques. A travers deux exemples technologiques (ici l'optimisation des apports azotés et les nouvelles technologies génomiques), **les matrices d'enjeux et d'action témoignent du fait que les propositions technologiques agricoles ne peuvent pas simplement se raisonner toutes choses égales par ailleurs.** Il est ainsi nécessaire de discuter d'enjeux réglementaires, socio-techniques, financiers, organisationnels, ou encore humains. Les enjeux de dépendance technologique et de combinaisons de leviers technologiques (soulignés également dans cette première étape) ont permis quant à eux de mieux cartographier les relations technologiques impliquées.

Les éléments discutés dans cette première étape restent néanmoins parfois un peu trop généraux - sous la forme de constats - et ne permettent pas d'apprécier suffisamment l'atterrissage des technologies sur le terrain, dans les conditions qui s'approchent de celles que vivent les agriculteurs. La deuxième étape de notre méthode cherche à y répondre en partie.

3. Étape 2 : Projection de deux innovations technologiques dans les fermes agricoles

Par souci de simplification et parce que le rapport a une visée méthodologique, **nous ne détaillerons à nouveau que deux innovations technologiques dans la deuxième étape de la méthode que nous proposons.** L'approche pourra être redéployée pour chaque technologie agricole envisagée.

Parce que le rapport cherche à démontrer l'applicabilité de la méthode dans des cas d'étude variés, la projection n'est pas réalisée sur les mêmes cas d'étude technologiques que précédemment. **Si la section précédente s'est intéressée aux technologies d'optimisation d'apports azotés et aux nouvelles technologies génomiques, cette section porte sur la robotique électrique de désherbage sélectif et de la sélection conventionnelle.**

Les matrices d'enjeux et de constats de ces deux nouveaux exemples sont présents [en annexes](#) pour les lectrices et lecteurs intéressés.

A. L'exemple de la robotique électrique de désherbage sélectif

Cette innovation technologique n'a pas été décrite dans la section précédente de manière à diversifier les cas d'études discutés dans le rapport. Nous renvoyons le lecteur vers les [annexes](#) où les matrices liées à la robotique sont présentées.

Bien que la définition des systèmes robotisés soit encore débattue pour des raisons de mobilité, de degré d'autonomie, de capacité d'apprentissage, d'étendue de la prise de décision ou encore de la capacité à pré-programmer le robot, nous avons considéré ici les robots dans une acception assez large. Dans ce cas d'étude, les robots sont des systèmes mécatroniques capables de réaliser une action de désherbage de façon assez autonome sous supervision humaine (en

collaboration ou pas) pour des applications dans des contextes végétaux et animaux. Dans ce cas d'étude, les robots sont alimentés à l'énergie électrique.

1. Analyse détaillée du cas d'étude robotique

Le tableau suivant présente des éléments de lecture au regard des principaux macro-critères et sous critères liés à l'utilisation d'outils robotique électriques de désherbage sélectif :

Macro-critères	Sous critères	Détails
Structure et taille de l'exploitation	Fractionnement et éloignement du parcellaire	Le déplacement des robots entre parcelles (par tracteur ou remorque) peut être pénible, notamment si le morcellement parcellaire est important. Impact environnemental du déplacement des robots par remorquage entre parcelles.
	Taille de l'exploitation	Potentiellement intérêt pour les exploitations avec une grande surface d'installer des bornes de recharge électrique pour les robots. Les paramètres de largeur de travail et débit de chantier de l'outil robotique peuvent permettre de travailler dans des plus ou moins grandes parcelles.
	Amortissement des technologies	Les outils robotiques sont plus difficiles à amortir sur des petites surfaces et des petites exploitations très diversifiées. Robots difficiles à amortir si pas d'économie d'échelle pour les constructeurs (besoin de nombreux robots vendus et de surfaces couvertes).
	Hétérogénéité des conditions pédoclimatiques sur l'exploitation	Pas vraiment applicable ici.
	État du matériel déjà existant sur l'exploitation	Le robot peut se rajouter à l'agro-équipement existant (au tracteur, notamment pour les grandes cultures). Des briques modulaires ou open-source peuvent limiter le phénomène.
	Relations à la main d'œuvre et aux compétences	Compétences spécifiques pour la maîtrise du robot, Besoin de formation et compétences pour une exploitation qui n'est pas mécanisée au départ (impact potentiellement plus fort sur maraîchage). Potentielle attractivité d'outils robotiques pour agriculteurs âgés si pas de repreneurs ou pour jeunes en quête d'installation.
Localisation de l'exploitation	Conditions pédoclimatiques locales	Besoin d'un terrain propre et pas trop accidenté. Difficulté de fonctionnement du robot si conditions difficiles (pluie, pente, canicules...).

	Proximité avec réseaux d'énergie	Besoin d'une ou plusieurs sources électriques de forte puissance pour recharge rapide (hangar, bâtiment agricole...). Possibilité d'avoir un panneau solaire embarqué sur le robot pour gagner un peu d'autonomie (problème des panneaux qui ne peuvent pas recharger le robot la nuit). Obligation d'aller se recharger (besoin potentiel d'une charge rapide). Plus facile d'implanter des robots si déjà réseaux accessibles à côté.
	Aides financières locales	Appui des collectivités locales, aides aux régions pour faciliter l'implantation des robots.
	Isolement de l'exploitation	Pas de service après-vente (SAV) ou de service de réparation robot si territoire isolé, Besoin d'un réseau de concessionnaires bien maillé.
	Relations avec les filières et débouchés sur place	Besoin d'homogénéité des filières sur place pour faciliter le travail des concessionnaires.
	Zones blanches locales	Problème de navigation RTK si zone blanche (mais peu de zones blanches qui n'y ont pas accès). Bonne connexion nécessaire pour le suivi par vidéo du travail du robot (si à terme pas de supervision). Soit antenne 5G, soit calcul embarqué. Les zones blanches forcent au traitement embarqué de l'information si absence de liaisons très haut débit (compliqué néanmoins de déporter complètement les calculs).
	Relations avec les exploitations agricoles voisines	Sociétés de services qui peuvent s'approprier les robots (plutôt pour grandes cultures légumières), Possibilité de développer des modèles de partage de robots (CUMA ou autres...) ou d'économie de la fonctionnalité.
Pratiques agricoles	Compatibilité avec des systèmes bio, ACS, agr-écologiques...	Possibilité de rattraper un désherbage mécanique qui aurait été raté. Diversité des formes de désherbage sélectif. Potentiellement robots multi-usages pour opérations autres que désherbage. Permettrait de redéployer des itinéraires qui feraient appel à beaucoup de désherbage manuel.
	Organisation du travail sur l'exploitation	Superviseur du robot qui peut diversifier ses tâches au champ. Potentiellement à terme un robot qui travaille 24h/24. Réorganisation des horaires de travail et délégation des tâches sur l'exploitation.

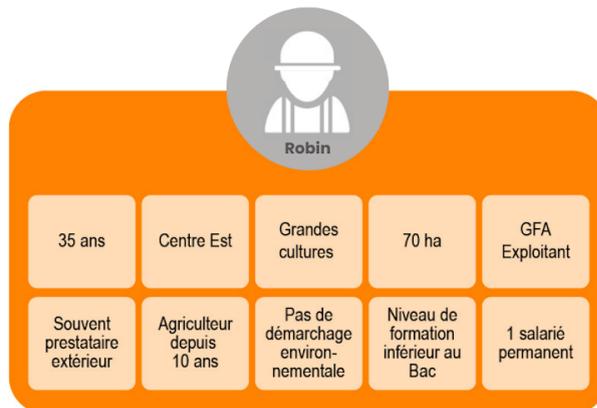
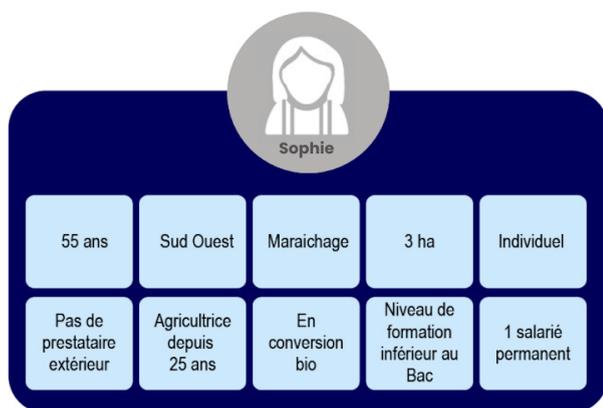
	Temps de travail	Débâts de chantier lents non acceptables pour des humains (notamment quand mécanisé). Une largeur de travail trop faible et un débit de chantier trop faible serait surtout impactant pour les grandes surfaces, notamment si fenêtres temporelles de travail courtes.
	Adaptation aux itinéraires en place	Dépend du système dans lequel on part : peut-être plus simple sur des grandes cultures légumières parce que système déjà mécanisé. Difficulté d'intensifier autant qu'avec travail manuel. Potentiellement nécessité d'adapter les systèmes de culture sur place au fonctionnement du robot. Pas trop adapté sur maraîchage sol vivant avec mulch épais ou autre
Réglementation et encadrement technique	Justification de pratiques culturales	Opérateur nécessaire pour surveiller les robots (mais cela pourrait évoluer)
	Contraintes de cahier des charges	Peut favoriser l'abandon de certains produits phytosanitaires et pousser à la conversion à l'agriculture biologique.

Tableau 4 : Analyse détaillée de l'implantation d'outils robotiques de désherbage sélectif dans les fermes

2. Scénarisation courte de deux profils agricoles autour d'outils robotiques de désherbage sélectif

Deux profils sont ici imaginés :

- Maraîchage sur petite surface
- Production légumes plein champ



L'organisation spatiale et la taille plus importante de l'exploitation de Robin impacte la logistique du travail de son outil robotique. La fragmentation de son parcellaire appelle à utiliser une remorque pour déplacer son robot entre les parcelles (tant que les contraintes réglementaires ne sont pas levées sur les déplacements autonomes des robots). La taille de son exploitation agricole facilite l'amortissement d'un robot sur le long terme mais demande également à la technologie robotique de travailler à un débit de chantier suffisamment important pour réaliser les opérations de désherbage dans les fenêtres temporelles imposées. L'outil robotique encore mono-tâche vient se rajouter aux agro-équipements présents sur l'exploitation, mais l'itinéraire cultural déjà mécanisé de Robin facilite l'intégration du robot dans le travail sur la ferme. Les parcelles de Robin sont localisées à moins de 2 km d'un réseau électrique ce qui facilite un potentiel raccordement directement à la parcelle et une recharge électrique du robot au champ. L'exploitation de Robin est à quelques kilomètres d'une grande ville de campagne. Un concessionnaire d'agro-équipements robotiques travaille sur la région et intervient sur plusieurs exploitations du territoire.

Sophie a bénéficié d'un guichet local d'appui à l'achat d'agro-équipements pour pouvoir investir dans cet outil robotique. Les 3 hectares de l'exploitation de Sophie sont d'un seul tenant. Le salarié permanent sur l'exploitation de Sophie gagne en confort de travail. Le débit de chantier du robot est assez faible mais le salarié passe ainsi plus de temps à observer la bonne implantation des cultures et le départ de foyers de maladies ou ravageurs. Ce salarié a passé plusieurs sessions de formation pour être en mesure d'accompagner le robot dans son travail. Sophie a décidé de réimplanter certaines cultures dont le désherbage manuel préalable était pénible et chronophage. N'ayant pas pu raccorder son exploitation agricole à un réseau électrique, Sophie a dû s'équiper de deux lots de batteries rechargées et utilisées en alternance. L'exploitation de Sophie, plus isolée, est moins bien desservie par des équipes de maintenance de ces outils

robotiques. Plusieurs heures sont nécessaires pour avoir un opérateur capable d'intervenir sur ses parcelles.

B. L'exemple de la sélection conventionnelle

Cette innovation technologique n'a pas été décrite dans la section précédente de manière à diversifier les cas d'études discutés dans le rapport. Nous renvoyons le lecteur vers les annexes où les matrices liées à la robotique sont présentées.

En quelques mots, dans ce cas d'étude, la sélection conventionnelle est considérée comme l'ensemble des techniques de croisement ou d'hybridation naturelle du matériel génétique d'une plante ou d'un animal, complétées par le marquage moléculaire et la sélection génomique qui garantissent une meilleure prise en compte des relations entre le génotype et l'environnement. Ces approches se distinguent d'autres innovations de sélection comme l'édition génomique (comme les nouvelles technologies génomiques qui sont discutées dans un cas d'étude du rapport) même si elles peuvent partager les mêmes objectifs.

1. Analyse détaillée du cas d'étude de sélection conventionnelle

Le tableau suivant présente des éléments de lecture au regard des principaux macro-critères et sous critères liés à l'utilisation de technologie de sélection conventionnelle.

Macro-critères	Sous critères	Détails
Structure et taille de l'exploitation	Fractionnement et éloignement du parcellaire	Pas vraiment applicable ici.
	Taille de l'exploitation	Période de traitement optimisé de plus en plus courte et aléatoire donc plus compliqué pour exploitations de grande taille. L'itinéraire agricole sera d'autant plus simplifié qu'il y aura une dépendance à des organismes de tris. La mise en place de semences de ferme peut être plus facile sur les petites exploitations sauf si l'exploitation fait appel à un prestataire ou adhère à une CUMA pour cette action.
	Amortissement des technologies	Les grandes exploitations pourraient mieux optimiser l'intégration des semences (semence fermière). Le choix entre semences fermières et semences certifiées est multifactoriel. L'idéal tendrait vers l'utilisation combinée de semences fermières et certifiées pour croiser des avantages économiques, un renouvellement variétal, de la simplicité et de l'autonomie.
	Hétérogénéité des conditions pédoclimatiques sur l'exploitation	Pas vraiment applicable ici.
	État du matériel déjà existant sur l'exploitation	Les exploitations qui ont une capacité de stockage ont une marge de manœuvre plus importante et de poids dans leurs décisions.
	Relations à la main d'œuvre et aux compétences	Pas vraiment applicable ici.

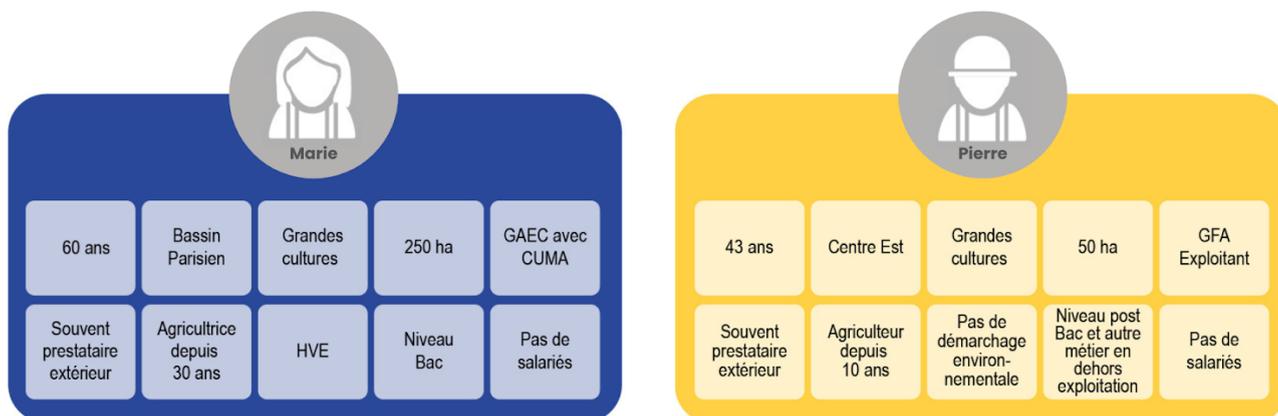
Localisation de l'exploitation	Conditions pédoclimatiques locales	Capacité de la sélection conventionnelle à développer des variétés adaptées à certains climats (sur des questions de précocité par exemple).
	Proximité avec réseaux d'eau	Le stockage carbone est augmenté s'il n'y a plus de contraintes sur la disponibilité en eau.
	Aides financières locales	Intégration potentielle dans les plans alimentaires locaux (PAT) et PCAET. Aides nationales : le plan protéines aide à la sélection de légumineuses.
	Isolement de l'exploitation	Pas vraiment applicable ici.
	Relations avec les filières et débouchés sur place	Impact des choix d'une coopérative locale sur les multiplications de semence ou autre. Dépendance aux organismes stockeurs locaux (et question des primes associées aux itinéraires si l'exploitation choisit telle ou telle variété).
	Relations avec les exploitations agricoles voisines	La question de la mutualisation des connaissances sur les variétés est importante (notamment dans les réseaux alternatifs). Partage de connaissances et formalisation des connaissances locales (peur de récupération/accaparement du matériel et du savoir par entreprises extérieures, risque d'ubérisation du travail en profitant des actions de réseaux de petits sélectionneurs). Possibilité de gestion par des formes d'organisation collective agricole (ex : Pommes de terre Pays Bas).
Pratiques agricoles	Compatibilité avec des systèmes bio, ACS, agroécologiques...	<p>Les modes de production actuels ne sont pas les plus économes en intrants. Réflexions à la ferme sur les mélanges les plus adaptés aux spécificités pédoclimatiques locales. Éléments d'agriculture durable rajoutés dans les critères d'inscription au catalogue. Besoin de variétés spécifiques pour le semis direct.</p> <p>L'agriculteur est maître de son choix (dans un certain cadre au regard du catalogue existant) mais n'a la main que marginalement sur l'évolution des activités de sélection si elles ne sont pas réalisées localement.</p>
	Organisation du travail sur l'exploitation	Pas vraiment applicable ici.

	Temps de travail	Le travail de multiplication peut représenter une hausse de main d'oeuvre (par exemple : castration du maïs).
	Adaptation aux itinéraires en place	Les variétés peuvent modifier ou impacter la structure des plantes et donc faire évoluer les structures techniques sur l'itinéraire.
Réglementation et encadrement technique	Justification de pratiques culturelles	Pas vraiment applicable ici.
	Contraintes de cahier des charges	Le label rouge réfléchit à retirer les raccourcisseurs à blé du cahier des charges. Les meuniers et les brasseurs imposent souvent des listes de variétés. Les contraintes sont possibles si l'on dispose des génétiques adéquates. Les nouvelles variétés peuvent également demander de définir de nouveaux itinéraires et être à l'origine de nouveaux points de vigilance.

2. Scénarisation courte de deux profils agricoles autour de la sélection conventionnelle

Deux profils sont ici imaginés :

- Agriculteur en Grandes Cultures avec Sélection conventionnelle dans la région
- Agriculteur en Grandes Cultures avec Sélection conventionnelle hors région



Marie se fournit quant à elle chez sa coopérative qui interagit avec un semencier de taille importante. Marie estime que son matériel végétal n'a pas besoin d'avoir été produit dans la région pour être adaptée à son exploitation. Elle suit les conseils délivrés par ses instituts techniques pour le choix de variétés adaptées à ses conditions pédoclimatiques. Ces semences permettent néanmoins à Marie d'être plus efficace tout au long de son itinéraire cultural parce que ses fenêtres temporelles sont de plus en plus courtes et aléatoires. Les semences coûtent relativement peu cher parce que l'entreprise de sélection a amorti ses investissements initiaux. Malgré tout, ces efforts de sélection doivent continuer dans le temps pour maximiser l'adaptation des variétés futures. Marie reçoit des primes filières de sa coopérative (à laquelle elle fournit ses récoltes) pour les variétés qu'elle utilise - variétés mises en avant par sa coopérative auprès de plusieurs agriculteurs voisins. Les pratiques de sélection conventionnelles utilisées *in fine* par Marie influencent ses trajectoires d'exploitation, en particulier parce que ses modes de production ne sont pas les plus économes en intrants, même si elle est rentrée dans une démarche HVE. Avec sa taille d'exploitation et ses potentielles capacités de stockage, Marie réfléchit à terme à intégrer une partie de l'activité de production de semences sur sa ferme.

Pierre entretient une relation assez étroite avec l'organisme de sélection qu'il privilégie. L'entreprise de sélection travaille sur des variétés adaptées au territoire où est installée l'exploitation. Pierre a passé du temps à réfléchir aux mélanges les plus adaptés localement. Sans faire directement de la sélection variétale au sens propre du terme (qui est portée par l'organisme de sélection avec qui il travaille), Pierre mélange des variétés et réalise en ce sens des sortes de sélection de mélanges. Ces variétés plus spécifiques demandent à Pierre de

retravailler une partie de ses itinéraires et de ses structures techniques. Pierre est satisfait de l'orientation donnée à sa trajectoire d'exploitation même si les évaluations concrètes de la validité économique et environnementale des choix variétaux n'est pas finalisée. Pierre fait partie d'un réseau d'agriculteurs au sein duquel il mutualise les connaissances développées autour de ses variétés. Il discute également avec sa coopérative pour décomplexifier les cahiers des charges en place de manière à faciliter ses évolutions de pratiques.

Retours sur la deuxième étape de la méthode : Une plongée dans les exploitations agricoles

Cette deuxième étape de notre méthodologie a permis d'interroger plus en profondeur la capacité des technologies (ici la sélection conventionnelle et la robotique électrique de désherbage sélectif) à s'inscrire dans le paysage des exploitations agricoles. Questionner l'interaction des technologies avec des facteurs de terrain (la taille et la structure de l'exploitation, la localisation de l'exploitation, les pratiques agricoles utilisées, les notions de réglementation et d'encadrement technique impliquées) favorise un échange concret et terre à terre avec les acteurs de terrain.

Les profils agricoles que nous avons invoqués montrent quant à eux des trajectoires différentes d'intégration technologique et témoignent ainsi de la diversité que peuvent prendre les systèmes technologiques sur le terrain. Sans juger ici de la pertinence ou non de ces technologies pour accompagner la transition agricole, nous montrons qu'il existe peut-être autant de formes d'appropriation technologique que de systèmes agricoles.

Penser les conditions de mise en œuvre des technologies agricoles

1. Un besoin de méthode pour analyser les technologies agricoles

Dans le cadre de cette note, nous plaçons pour que les acteurs qui interviennent dans le développement d'innovation technologique opèrent systématiquement une évaluation de l'impact des différentes options technologiques. Nous avons proposé une méthodologie pour évaluer l'atterrissage des technologies sur le terrain. **Cette méthode est d'autant plus importante qu'il ne semble pas que les principaux acteurs qui accompagnent le déploiement de technologies agricoles** (acteurs du financement, chaires d'entreprises, regroupements et collectifs agritech ou biotech, etc.) **aient de grille de lecture pour apprécier la pertinence d'une technologie pour accompagner la transition du secteur, ou même pour simplement identifier ses externalités négatives ou effets rebonds.** Il est donc à craindre que les décisions de soutien à certaines innovations (via des hubs, incubateurs, banques, etc.) soient davantage motivées par de l'opportunisme ou par une effervescence médiatique que par la contribution réelle attendue aux trajectoires de transition. Dans la mesure où ces acteurs participent à faire évoluer ou à reconfigurer des trajectoires agricoles, il paraît important de s'intéresser de plus près à la qualité des arguments qui gouvernent ces décisions⁴¹.

Pour rappel, l'approche méthodologique discutée dans ce rapport distingue deux étapes principales ayant pour objectif de passer une technologie agricole au crible.

La première étape consiste en quatre sous parties :

- offrir une description générale de la technologie pour s'assurer de sa compréhension,
- préciser les dépendances technologiques et flux physiques associés pour évaluer les risques d'introduction de la technologie dans une transition énergie-climat de l'agriculture,
- cartographier les enjeux associés à un déploiement de cette technologie, et
- évaluer les potentielles synergies avec d'autres leviers technologiques dans la mesure où la combinaison technologique peut aussi s'avérer pertinente (nous en reparlerons plus loin).

La cartographie des enjeux et des leviers d'action est certainement la section la plus délicate et la plus importante. Elle impose de ne pas s'arrêter à une simple lecture technologique de la situation, mais bien à ouvrir le champ des possibles et à s'intéresser aux enjeux réglementaires, socio-techniques, financiers, organisationnels, ou encore humains avec lesquels les technologies agricoles peuvent interagir. C'est ainsi l'occasion de recueillir également *ex-ante* des connaissances sur les effets positifs et négatifs des technologies agricoles. Cette

⁴¹ Klerkx, L., & Villalobos, P. (2024). Are AgriFoodTech start-ups the new drivers of food systems transformation? An overview of the state of the art and a research agenda. *Global Food Security*, 40.

première étape est non seulement un constat – sous la forme d'une cartographie d'enjeux – mais aussi une mise en action, dans le sens où il doit être possible de répondre à l'ensemble des enjeux avec des propositions claires et acceptables, sans quoi le déploiement technologique pourrait être remis en question.

La deuxième étape propose d'aller un cran plus loin afin d'éprouver la capacité des technologies agricoles à s'adapter au terrain existant, dans sa diversité. A l'aide de quatre macro-critères (structure et taille de l'exploitation, localisation de l'exploitation, pratiques agricoles, réglementation et encadrement technique) et de sous-critères associés, nous appelons à questionner concrètement comment les trajectoires des fermes se mêleront ou pas aux trajectoires technologiques. Pour donner encore plus vie à cette méthode, nous proposons d'y adjoindre des profils – censés représenter une réalité agricole (plus ou moins locale) pour pouvoir projeter des technologies dans une utilisation agricole quotidienne et la discuter.

La méthode proposée est bien sûr critiquable parce que la transformation agricole est principalement discutée sous l'angle des innovations technologiques, et que les technologies n'ont que relativement peu de sens lorsqu'elles sont éloignées de leurs conditions d'existence sur l'exploitation agricole. La deuxième étape de notre méthode permet néanmoins d'engager une discussion plus large dans le cadre du système agricole de l'exploitation puisque des critères terrain beaucoup plus explicites sont abordés.

Dans la mesure où le déploiement des technologies agricoles dépend nécessairement du contexte dans lequel elles viennent s'insérer, **nous ne pouvons nous départir d'une approche au cas par cas pour juger de l'intérêt d'une technologie en particulier.** Nous avons besoin d'une évaluation de la pertinence énergie-climat (ici parce que nous traitons le sujet dans le cadre des travaux du Shift Project) des technologies qui soit systématique (pour chaque technologie, chaque cas particulier, chaque application donnée, etc.) et exhaustive (en prenant en compte les impacts directs et les impacts indirects et systémiques).

De manière générale, **cette méthode doit s'inscrire dans une approche de recherche et d'innovation responsable**⁴² (RRI – responsible research and innovation). Les quatre piliers d'une approche de recherche et d'innovation responsable : [1] anticipation (des risques), [2] inclusion (de nombreux acteurs autour de la table), [3] réflexivité (pour évaluer si des trajectoires mutuellement bénéfiques sont suivies) et [4] réactivité (capacité à répondre rapidement aux problèmes causés) doivent être régulièrement questionnés⁴³. **Cette approche et les résultats qui en ressortent doivent être rendus transparents et doivent chercher au maximum à mobiliser des collègues variés d'acteurs** (en termes de compétences et de discipline de travail). Il n'y a pas aujourd'hui d'obligation (et même très peu d'incitation) à ce que ces questionnements soient soulevés par les acteurs de l'écosystème technologique.

⁴² Bellon-Maurel et al. (2022). Digital revolution for the agroecological transition of food systems: A responsible research and innovation perspective. *Agricultural Systems*, 203, 103524.

⁴³ Klerkx, L., and Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, 24.

2. Réfléchir aux orientations technologiques des systèmes agricoles

A. Des technologies à penser au service de scénarios de transition plus large : l'exemple du travail du Shift Project

Il était prévu au départ de cette note d'évaluer comment les quatre scénarios discutés dans le rapport "Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère" du Shift (souveraineté alimentaire, souveraineté énergétique, sécurité alimentaire, scénario de conciliation) pouvaient ou non orienter certains développements technologiques. C'était également l'occasion de se demander si les trajectoires technologiques pouvaient elles-mêmes infléchir les choix scénaristiques dans le sens où il n'est jamais vraiment clair si les technologies « permettent » ou « sont permises par ».

Si nous avons acté que les scénarios proposés n'étaient pas assez contrastés d'un point de vue technologique en ce sens qu'ils n'imposent pas d'arrêt ou de déploiement technologique, nous pouvons néanmoins amener quelques exemples et éléments de discussion.

The Shift Project envisage des réductions fortes dans l'utilisation des engrais minéraux azotés. Si une partie de cette diminution est à trouver dans l'implantation massive de légumineuses et dans les cultures associées que The Shift Project préconise, il n'en reste pas moins que des optimisations d'apports d'azote sont attendues. Les technologies de pilotage de la fertilisation azotée et les technologies d'apport de fertilisation par agro-équipement sont ainsi à considérer dans une logique de diminution de la dépendance à l'azote minéral. Le pilotage intégral de l'azote (via des modèles dynamiques), la modulation intra-parcellaire des apports d'azote ou encore l'enfouissement de l'azote sont autant d'approches susceptibles d'accompagner le secteur dans sa transition. Rappelons que des hypothèses fortes d'augmentation de biomasse sont faites dans les scénarios. Sous contrainte d'engrais azoté minéral, la précision des apports et l'efficacité d'utilisation de l'azote par les plantes seront d'autant plus importantes.

L'agriculture biologique prend une place significative mais non prépondérante dans les partis pris des pratiques agricoles envisagées (autour de 25%). Du point de vue des technologies, deux tendances peuvent ainsi être considérées. D'une part, le besoin de continuer à mobiliser les technologies existantes sur les autres systèmes de production puisqu'ils continueront toujours à exister. De l'autre, le besoin de déployer des outils technologiques pour accompagner la filière biologique, comme les systèmes bas intrants, qui demande, à l'heure actuelle, des tâches administratives supplémentaires et des exigences de traçabilité (contrôleurs, organismes de certification, coopératives, etc.), et de sensibiliser les concepteurs de technologies aux spécificités de l'agriculture biologique⁴⁴.

Le développement fort des légumineuses et des associations culturales (blé/pois, blé/lentilles, ...) peut demander des efforts technologiques en amont des industries agro-alimentaires pour s'assurer à la fois que l'on dispose de variétés adaptées aux mélanges interspécifiques et que l'on ne trouve pas de résidus de légumineuses dans les

⁴⁴ Schnebelin, Éléonore, et al.. 2021. "How Digitalisation Interacts with Ecologisation? Perspectives from Actors of the French Agricultural Innovation System." *Journal of Rural Studies*.

stocks céréaliers envoyés aux transformateurs après triage. Des développements dans les trieurs optiques peuvent ainsi être attendus pour rendre possible la pratique des associations d'espèces et de variétés adaptées aux conditions locales dans une majorité de parcelles⁴⁵. Ce développement de légumineuses devra être accompagné par des efforts importants sur la sélection variétale et l'amélioration génétique des légumineuses, encore trop peu présents à l'heure actuelle. Cela se matérialise notamment par des carences matérielles pour les généticiens et les sélectionneurs travaillant sur les légumineuses (capacité à disposer de marqueurs moléculaires et autres technologies d'identification des allèles d'intérêt agronomique).

Ajoutons néanmoins ici le besoin que l'ensemble des maillons de la chaîne agricole joue son rôle. Jusqu'à quel point l'enjeu de transition doit-il être porté sur des questions technologiques et non pas sur des remises en cause des demandes des acteurs de l'aval, des demandes des consommateurs ou encore des enjeux nutritionnels ?

Nous pourrions par exemple questionner la légitimité du développement des trieurs densimétriques et optiques évoqués plus haut pour éviter les résidus de légumineuses dans les associations de culture en sortie de parcelle. Il est effectivement envisageable que les industries agro-alimentaires remettent en question les normes et standards de produits en entrée de leur chaîne ou fassent évoluer leurs gammes de produits. Il peut être également attendu des citoyens des évolutions dans leurs attentes de consommation pour faciliter et accompagner l'atterrissage de ces cultures associées ; sans avoir nécessairement besoin de développer des infrastructures massives de tri. Les fenêtres temporelles des itinéraires agricoles se raccourcissent et pourtant, les acteurs de l'aval sont toujours plus exigeants sur la qualité des récoltes (on s'autorisait par exemple par le passé à récolter des produits plus humides). Les organismes stockeurs ferment plus tôt dans la nuit ce qui amène à renforcer la dimension des machines pour pallier les limites de ressources humaines de ces coopératives.

Dans le cadre des productions animales, il est manifeste que le déploiement technologique est plus simple lorsque les animaux sont en bâtiment, tout simplement parce que les contraintes techniques sont moindres et parce que le système dans son ensemble est mieux contrôlé. Un scénario de production alimentaire forte destinée à l'export imposera certainement une organisation du travail liée à des technologies capitalistiques déployées massivement (robots, modulation de l'alimentation animale, couverture des fosses de stockage d'effluents) pour à la fois produire et limiter les émissions de gaz à effet de serre. La technologie aide ici à satisfaire la demande de surveillance et d'occupation de l'éleveur, surtout en cas de cheptels larges (et ce sur plusieurs sites par exemple). De la même façon, la valorisation des coproduits, notamment tourteaux, pour l'alimentation animale, peut appeler aussi à une augmentation du nombre d'animaux en bâtiments. Dans cette optique-là, ce sont surtout des technologies numériques d'optimisation de la logistique et de gestion des flux qui seront certainement amenées à être développées.

The Shift Project appelle à une revue à la hausse de la polyculture élevage et fait ainsi le pari d'une redistribution des cheptels sur les territoires français. On peut ainsi penser que les unités de production et technologies associées attendues seront plus petites et mobiles. Des exemples sur les territoires de robots de traite mobiles sont certainement intéressants à creuser⁴⁶. Les entreprises de travaux agricoles (ETA) seront certainement beaucoup plus sollicitées dans ce cadre là parce que les agriculteurs en polyculture-élevage préféreront prioriser

⁴⁵ Caquet et al. (2020). Agroécologie – Des recherches pour la transition des filières et des territoires. Chapitre 6 : Contribution des agro-équipements et du numérique à l'agroécologie. Renforcer la prise en considération du vivant. Edition Quae.

⁴⁶ La France Agricole (2024). Numéro 4077 - Dossier « Valoriser l'herbe en traite robotisée »

leurs investissements, en privilégiant par exemple un bâtiment agricole pour l'élevage à une machine agricole pour la production végétale. Le déploiement technologique dans les ETA (capteurs embarqués sur machines, agro-équipements performants, etc.) pourra participer lui aussi à une diminution des impacts des pratiques culturales.

Dernier exemple avec le stockage de carbone dans les puits agricoles qui revêt une importance particulière dans les scénarisations du Shift Project. S'il est encore une fois accepté que ce sont bien les pratiques agricoles et non pas les technologies qui sont stockantes, les technologies qui accompagneront les pratiques de stockage de carbone dans le sol seront à favoriser. Outre les outils numériques de surveillance de la mise en place de ces pratiques agricoles (via les constellations Sentinel-2 par exemple), les outils numériques d'appui à la remontée de données agronomiques pour nourrir les modèles de calculs de carbone stocké et/ou d'émissions évitées, et de mise en relation d'acteurs agricoles pour le paiement carbone pourront avoir du sens⁴⁷.

B. Combiner les technologies agricoles et coupler les formes d'innovation

Dans cette note, la majorité des technologies est étudiée en silo (chacune étant analysée seule). Nous évoquons néanmoins à plusieurs reprises le fait que les technologies agricoles sont enchevêtrées parce qu'elles dépendent d'autres architectures techniques ou de technologies particulières et qu'elles peuvent s'en nourrir dans une plus ou moins grande mesure.

La combinaison de technologies agricoles est ainsi un cas de figure à étudier dès qu'une alliance est jugée pertinente, et peut permettre d'élargir le spectre des données collectées, de l'information modélisée, ou des actions de terrain. C'est d'ailleurs pour cela que la méthodologie d'analyse des technologies que nous proposons évoque, en deuxième étape, la recherche de synergies potentielles entre technologies agricoles. A titre d'exemples de combinaisons :

- L'apport localisé de fertilisants minéraux azotés en grandes cultures peut être obtenu à l'appui d'une combinaison de technologies satellitaires pour capter des niveaux de biomasse, de modèles inverses de transfert radiatif pour générer une préconisation azotée, et d'agro-équipement de fertilisation pour moduler les apports au champ. Ce croisement permet de spatialiser les apports d'azote sur les parcelles en fonction des besoins azotés locaux.
- Les technologies de tracking GPS peuvent être mobilisées conjointement avec des technologies de télédétection (satellite, avion, drone) pour croiser le passage d'animaux dans des systèmes agro-pastoraux avec des indicateurs géomatiques de la ressource pâturée. Ce croisement permettrait par exemple de discriminer certains patchs végétaux à protéger et d'autres où la pression de pâturage peut être augmentée.

Notre approche s'est concentrée sur une forme d'innovation parmi d'autres : les innovations technologiques. D'autres approches d'innovation agronomiques (relay-cropping, semis

⁴⁷ Aspexit (2021). La course au carbone en Agriculture. Accessible en ligne : <https://www.aspexit.com/blog-agriculture-et-numerique/>

direct sous couvert, cultures associées et plantes de service, etc.), ou encore organisationnelles (circuits d'approvisionnements, mutualisation d'outils via des organisations collectives, etc.) sont tout à fait à même de faciliter des trajectoires agroécologiques.

Il faut garder à l'esprit que ces innovations sont tout à fait compatibles entre elles, et que ce sont surtout des systèmes d'innovations, associant différentes techniques et modes d'organisation, qui pourront répondre à la fois aux différents enjeux et à la diversité des situations spécifiques locales. Les technologies, par leurs compositions très variées, peuvent participer à soutenir ces autres formes d'innovation non technologiques. Ces innovations couplées (couplages entre différentes formes d'innovations et couplages à plusieurs niveaux des systèmes alimentaires) peuvent participer à lever des contraintes du système actuel ou à susciter de nouvelles opportunités d'innovation⁴⁸. A titre d'exemples :

- Les technologies numériques peuvent soutenir le déploiement de modes d'organisations en circuits courts ou en réseaux et faciliter l'échange et le partage d'informations entre pairs.
- Un agro-équipement paysan peut-être développé spécifiquement pour accompagner une pratique de semis direct, tout en étant suffisamment ergonomique pour limiter la difficulté du travail au champ.

C. Adopter un principe de sobriété pour les technologies agricoles

Les cas d'étude présentés dans le rapport témoignent de la grande difficulté à disposer de chiffres consolidés sur les capacités d'atténuation et d'adaptation des technologies agricoles. Ces évaluations sont d'autant plus compliquées que l'écosystème Agritech et Biotech évolue très vite, que les outils technologiques peuvent servir plusieurs fonctions en même temps (gain de temps, diminution de la pénibilité, économie d'intrants...) et que les effets rebonds ne sont jamais très loin^{49,50}. **Bien qu'il soit pertinent de s'intéresser aux systèmes, à leurs interactions et à leur évolution générale plutôt qu'aux technologies prises isolément, il sera certainement nécessaire de passer par une phase de quantification précise des effets technologiques, toute chose égale par ailleurs, pour évaluer la place de ces technologies dans la transition du secteur.**

Il serait utopiste de faire reposer l'entièreté des efforts de décarbonation agricole sur des transformations de modèle agricole sans aucun espace pour les technologies agricoles, et certainement dystopique d'imaginer une décarbonation uniquement permise par les technologies agricoles. **La réflexion sur l'avenir des technologies agricoles devra nécessairement investir le champ de la sobriété.**

⁴⁸ Jeuffroy, M.H., & Salembier, C. (2021). Innovations couplées pour la transition agroécologique. Séminaire ACT-AgroEcoSystem.

⁴⁹ Huck, C., et al. (2024). Environmental assessment of digitalisation in agriculture : A systematic review. Journal of Cleaner Production, 472.

⁵⁰ La Rocca, et al., (2024). Estimating The Carbon Footprint Of Digital Agriculture Deployment: A Parametric Bottom-Up Modelling Approach. Journal of Industrial Ecology.

Ces efforts de sobriété doivent se penser à plusieurs échelles : une sobriété individuelle, une sobriété collective, et une sobriété structurelle. A titre d'exemple, il est manifeste que l'agriculture française est sur-mécanisée en termes d'agro-équipement⁵¹. Les tracteurs sont souvent surévalués par rapport aux outils qu'ils sont censés attelés. Une partie du parc est quant à elle largement sous-utilisée.

- Une **sobriété individuelle** passera par exemple, pour un agriculteur ou une agricultrice, par un raisonnement sur l'acte d'achat de son agro-équipement, par des diagnostics plus fins d'adéquation entre tracteur et outils en fonction des pratiques agricoles à réaliser et par une meilleure utilisation de son parc (vérification du gonflage des pneus, utilisation du tracteur dans les bonnes plages, etc.).
- Une **sobriété collective** se manifestera par une réorientation du soutien fiscal pour éviter la sur-mécanisation individuelle, pour éviter les logiques de renouvellement inutilement fréquent du parc de machines, ou pour appuyer l'utilisation de carburant alternatif (à la fois pour l'agriculteur, mais aussi pour les constructeurs).
- Une **sobriété structurelle** fera quant à elle appel à des modes d'organisation différents, en mettant par exemple à profit le partage et la mutualisation de l'agro-équipement (via des CUMA – Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole).

Ces efforts de sobriété sont bien évidemment conséquents parce qu'ils peuvent introduire des contraintes logistiques supplémentaires, d'autant plus que les fenêtres temporelles d'action sur les itinéraires agricoles évoluent et continueront à évoluer avec le dérèglement climatique.

La quantification des effets technologiques est nécessaire pour arbitrer les scénarios technologiques à déployer. Ceci est d'autant plus important que les effets à considérer sont parfois multi-factoriels et peuvent être contradictoires entre eux :

- Sur la taille des machines agricoles par exemple, plus les machines sont larges et lourdes, plus l'efficacité par tonne de produit agricole transporté ou utilisé est efficace, d'autant plus que les temps de manœuvre sont diminués. Avec l'augmentation de la dimension des machines agricoles, nous prenons néanmoins le risque de nous éloigner de la polyvalence de certains agro-équipements, pour rentrer alors dans des logiques de spécialisation et d'optimisation du parc du point de vue de la consommation énergétique. La taille des machines impactera également les niveaux de compaction des sols.
- Sur le mix énergétique des agro-équipements, dans la mesure où 80% des parcelles sont à moins d'1.5 km d'un réseau HTA (haute tension de classe A), on pourrait laisser présager d'un approvisionnement électrique de certains agro-équipements (ou robots) pour ne pas avoir de batteries surdimensionnées. Les tracteurs au méthane ne portent actuellement pas encore une charge pleine et il faudrait éviter que les allers-retours dans les corps de ferme ou autres centres de rechargement ne demandent trop d'énergie. Les agro-équipements très énergivores (ensileuse, moissonneuse-batteuse) ne pourront quant à eux très certainement pas passer sur ces modes de substitution d'énergie.

Rejeter l'agro-équipement au prétexte qu'il serait technologique relèverait d'une posture idéologique. Outre le fait que des équipements puissent être développés dans des formats très low tech (voir annexe – agro-équipement paysan, pour du désherbage sélectif ou encore le semis

⁵¹ FNCUMA (2024). Plaidoyer pour une mécanisation responsable, durable et vivable de l'agriculture française

direct sous couvert), les machines agricoles ont tout à fait leur place pour accompagner des pratiques décarbonantes. On pensera par exemple aux technologies d'enfouissement de l'azote de certains agro-équipements pour la fertilisation azotée des productions végétales. **Cependant, quoi qu'il arrive, le déploiement de technologies doit être considéré dans une logique de sobriété afin que leurs conséquences ne viennent allonger la liste des difficultés auxquelles le secteur fait déjà face.**

D. Adopter une culture du principe de précaution pour limiter les risques

Les analyses technologiques se doivent d'être dynamiques et non pas statiques dans le temps. Nous conseillons d'adopter une posture précautionneuse et de ne pas faire de pari risqué quant à l'utilisation et au déploiement de technologies agricoles, d'autant plus que nous n'avons pas pleine conscience des évolutions probables de notre monde, outre une certaine baisse de flux physiques de matières et d'énergie. Les récents exemples de surconsommation électrique de grandes multinationales (et d'émissions de gaz à effet de serre associés), notamment Google et Microsoft⁵², quant au déploiement de technologies d'intelligence artificielle (IA), avec la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre qui en découlent, donnent à penser que ces risques n'ont pas été suffisamment anticipés. Dans la mesure où ces moteurs d'intelligence artificielle sont aussi utilisés en agriculture, même si dans un moindre niveau que dans les autres secteurs de l'économie, ces enjeux sont tout particulièrement d'actualité.

Chaque nouveau développement doit être questionné au regard de ce qu'apporte réellement un surplus de technologie. Les gains de précision apportés par exemple par de meilleures résolutions spatiales (pixels plus fins), temporelles (revisite plus régulière) ou spectrales (information plus fine) de futurs satellites d'observation de la terre (soit par des satellites plus précis ou par une augmentation du nombre de satellites) sont à juger non plus seulement par la richesse d'informations qu'ils peuvent apporter mais par une analyse coût-bénéfices sérieuse, notamment en imaginant comment la réponse à cette analyse est susceptible d'évoluer à l'avenir.

Par ailleurs, il est fréquent et plausible qu'une technologie ou qu'un mix technologique ne se déploie pas dans les conditions considérées initialement, et aient donc des effets différents *in fine*. Ces risques de non-déploiement sont nombreux et ne sont pas nécessairement liés à une question technologique. Un passage à l'échelle de technologies agricoles peut en effet être limité entre autres par (cette liste n'est pas exhaustive) :

- des obstacles infrastructurels (les architectures réseau requises peuvent par exemple ne pas être disponibles dans les zones rurales),
- des obstacles sur les flux physiques (des contraintes peuvent être présentes sur le type d'énergie disponible et son accessibilité ou son approvisionnement pour faire fonctionner les technologies agricoles),
- des obstacles organisationnels et/ou de compétences (avec par exemple des bassins de maintenance – réparation de matériels agricoles non répartis sur tous les territoires),

⁵² Le Monde (2024). Après Microsoft, Google voit ses émissions de CO₂ bondir à cause de l'IA.

- des obstacles réglementaires (le déplacement des robots agricoles entre parcelles est actuellement limité pour des questions de sécurité),
- des obstacles économiques (le retour sur investissement de la technologie n'est pas jugé suffisamment intéressant par les acteurs de terrain), ou encore
- des obstacles éthiques et/ou sociaux (une technologie est rejetée par nature parce qu'elle remettrait en cause ou transformerait trop profondément le travail des agriculteurs).

Ces risques sont en partie discutés dans les matrices que nous avons proposées mais il est évident **qu'une cartographie fine des risques de non-déploiement doit être réalisée au plus tôt, de manière à pouvoir naviguer dans cette incertitude**. Il conviendra notamment d'assurer des voies de sortie, en évaluant par exemple les leviers (autres technologies, leviers organisationnels et de sobriété, etc.) pouvant remplacer des technologies qui ne se seraient pas déployées ou pour lesquels le déploiement se passerait moins bien que prévu. Les notions de verrouillage technologique et de dépendance au sentier évoquées dans ce rapport permettent d'envisager les cas où nous nous engagerions trop profondément dans des cadres technologiques (une technologie en particulier ou un mix technologique) sans pouvoir revenir en arrière et de questionner, dans ces cas-là, ce qui se passerait si des contraintes ou chocs (financières, énergétiques, etc.) venaient à frapper à notre porte.

3. Cultiver l'hétérogénéité

A. Outiller l'ensemble des systèmes agricoles et ne pas rechercher la standardisation

Une technologie en support à l'agroécologie peut être définie par sa contribution à informer ou à contrôler les processus qui sous-tendent les principes de l'agroécologie⁵³. Les systèmes agroécologiques évoluant dans des environnements changeants avec une forte ambiguïté et une forte incertitude sont hétérogènes par nature. Les technologies agricoles qui viendront les appuyer doivent exploiter cette hétérogénéité non pas pour la standardiser mais bien pour l'exacerber⁵⁴. Cette diversité, dans un monde sous contraintes, apportera plus de résilience aux chocs à venir.

Dans les scénarios du Shift Project et dans la majorité des scénarisations proposées à l'échelle France (TYFA, Afterres, etc.), les systèmes de production agricoles restent diversifiés. **Cette culture de l'hétérogénéité appelle à outiller correctement l'ensemble des filières et systèmes de production qui, pour certaines, ont été sensiblement oubliées ou du moins mises de côté**. Nous invitons ainsi à réfléchir largement le transfert technologique de ce qui existe déjà dans certaines filières et à remobiliser les technologies existantes et les rendre disponibles et accessibles pour d'autres filières (agriculture biologique, légumineuses etc.). Cette adaptation n'est pas évidente et imposera une remise en question puissante des développeurs de technologies et des institutions en place.

⁵³ Caquet et al. (2020). Agroécologie – Des recherches pour la transition des filières et des territoires. Chapitre 6 : Contribution des agro-équipements et du numérique à l'agroécologie. Renforcer la prise en considération du vivant. Edition Quae.

⁵⁴ Zingsheim, M.L., & Doring, T.F. (2024). What weeding robots need to know about ecology. Agriculture, Ecosystems, and Environment, 364/

Les systèmes en agriculture biologique ou qui impulsent la mise en place de pratiques agroécologiques (en partant de pratiques incrémentales jusqu'à des pratiques transformantes) ont souvent des modes d'exploitation plus complexes et diversifiés, et des ateliers multiples. **Les technologies classiques ne semblent pas adaptées à ces itinéraires qui, au contraire des systèmes relativement homogènes du modèle agricole dominant, cherchent à cultiver leur hétérogénéité.** Ces systèmes diversifiés ont besoin d'être accompagnés sur l'entièreté de leurs cycles de production en termes de planification avec par exemple des simulateurs d'assolement et de rotations parce que les enchaînements culturaux sont techniques. Les systèmes en polyculture-élevage, gérant plusieurs ateliers, ont besoin d'avoir une vision panoramique de leur ferme en termes de pâturage, culture, et filières.

Les outils de sélection variétale et d'édition génomique (marqueurs et autres) doivent être largement remobilisés vers les filières de légumineuses (luzerne, lentilles, soja...) pour appuyer le lancement de ces nouvelles filières. Les stratégies de sélection devront intégrer de plus en plus de notions autour de l'hétérogénéité et de la diversité, non seulement au niveau individuel, mais aussi au niveau du groupe d'individus qui composent le couvert végétal ou le troupeau⁵⁵. Il y a d'ailleurs un enjeu particulier autour de l'hétérogénéité pour les légumineuses, appelées à croître essentiellement sous la forme de cultures associées avec des céréales ou des graminées (en prairies) pour des raisons d'équilibre économique et de complémentarités d'ordre agronomique et nutritionnelle.

Les systèmes agricoles que nous voulons voir advenir doivent être soutenus, notamment parce que certains peuvent être chronophages à gérer. Certaines fermes en système agro-pastoral avec des élevages en lâcher dirigé ont par exemple été très précoces sur l'adoption du tracking GPS pour savoir où étaient localisés leurs animaux, surtout dans des territoires accidentés. Des technologies numériques pourront également être déployées pour favoriser la communication entre pairs, le partage de bonnes pratiques agroécologiques (parce que les références techniques manquent), ou encore la formalisation de connaissances expertes et locales.

Il sera certainement nécessaire également de prouver à la fois que des pratiques agroécologiques ont été mises en place mais aussi que ces pratiques ont un impact réel sur la transition écologique des agrosystèmes. **Des formes d'obligations de résultats pourront être attendues, justifiées par des données collectées et remontées par des technologies agricoles** (surveillance satellitaire, capteurs embarqués, etc.). Les financements de ces pratiques (paiements pour services environnementaux, primes filières ou autres) pourront être conditionnés à ces obligations de résultats.

B. De la nécessité d'un raisonnement multi-échelles

La transformation du système agricole amène à développer des filières et systèmes de production qui, pour certains, sont encore largement minoritaires dans le paysage agricole. Les associations de cultures et les légumineuses sont par exemple plutôt considérées par les fermes biologiques et/ou en système bas intrants. **Les technologies pourraient être vues comme des**

⁵⁵ Gascuel-Oudou, C., et al. (2022). A research agenda for scaling up agroecology in European countries. Agronomy for Sustainable Development.

catalyseurs ou des facilitateurs de la mise en mouvement pour envisager un passage à l'échelle des pratiques agricoles.

Ces technologies, susceptibles d'appuyer un passage à la vitesse supérieure, ne doivent pas être proposées dans une logique du « one size fits all » mais bien s'inscrire dans des dynamiques et trajectoires locales. Une réorganisation des paysages agricoles, comme ce que The Shift Project préconise lorsqu'il met en avant une augmentation de la polyculture élevage, pourrait appeler à déployer spatialement certaines technologies peut-être encore non disponibles ou disponibles seulement dans certains territoires. Tout un écosystème peut effectivement être nécessaire en local (réparateurs et services après-vente, concessionnaires, filières et débouchés, etc.) pour permettre l'atterrissage de certaines technologies sur le terrain. Théo Martin explore par exemple l'impact des robots de traite à des échelles organisationnelles différentes (exploitation agricole, coopérations entre éleveurs utilisant ou non les robots, bassin de maintenance au sein d'un réseau de concessionnaires agricoles, etc.)⁵⁶

L'étude des systèmes agricoles demande de poser les enjeux à des échelles spatiales variées : parcelles, filières, paysage, etc. Raisonner seulement à l'échelle de la parcelle revient à raisonner en vase clos, ou tout du moins morcelé. Les technologies agricoles peuvent servir à prendre ce recul-là. Dans le cas d'étude sur le suivi des ravageurs/bioagresseurs ([voir annexes](#)), nous éclairons l'intérêt des technologies numériques pour un suivi dynamique et spatialisé des bioagresseurs à l'échelle territoriale, notamment en combinant des pièges connectés, des approches participatives, des données de stations météo connectées ou encore des données satellitaires.

De manière générale, **force est de constater que le développement technologique reste encore concentré à des échelles spatiales et temporelles restreintes**, alors même que des systèmes agroécologiques vont davantage dépendre d'effets de voisinage ou encore d'éléments du paysage. Ces approches multi-échelles sont d'autant plus compliquées que les solutions agroécologiques sont très situées dans le temps et l'espace, donc très dépendantes des conditions locales⁵⁷.

⁵⁶ Martin, T., (2023). Les Sentinelles de l'Étable. Robotisation de la traite et nouvelle division du travail dans l'élevage laitier français. Thèse de Doctorat.

⁵⁷ Caquet et al. (2020). Agroécologie – Des recherches pour la transition des filières et des territoires. Chapitre 6 : Contribution des agro-équipements et du numérique à l'agroécologie. Renforcer la prise en considération du vivant. Edition Quae.

4. Projeter les compétences et emplois à venir

A. De nouvelles compétences à développer

Les technologies agricoles, si elles se déploient, vont nécessiter de nouvelles connaissances et compétences de l'ensemble de l'écosystème agricole^{58,59}.

Toutes les technologies ne requièrent pas le même niveau de compétences : certaines technologies seront utilisées au sein de la ferme et demanderont d'être maîtrisées (technologies numériques, robotique etc.) alors que d'autres investiront la ferme mais demanderont surtout d'adapter les pratiques agricoles (ex : sélection variétale, nouvelles technologies génomiques, biocontrôle, etc.). Les technologies à plus forte intensité d'information, qui vont générer plus de données ou des préconisations agronomiques, demanderont des compétences plus spécifiques pour comprendre les résultats obtenus. Ce sera peut-être d'autant plus vrai dans un cadre de transition agroécologique, là où les besoins en nouvelles observations et connaissances sont d'autant plus importants.

Nous pouvons nous attendre également à ce que **l'externalisation des services dits d'agriculture de précision, en hausse en France⁶⁰, relâche la responsabilité de la montée en compétence sur d'autres structures externes à la ferme agricole.**

Les conseillers agricoles, en tant qu'intermédiaires dans les réseaux de connaissances et de conseils agricoles, sont une composante essentielle de tout système d'innovation agricole^{61,62}. L'atterrissage de technologies agricoles sur le terrain ne dépend ainsi pas seulement de l'agriculteur mais bien de l'ensemble de l'écosystème qui gravite autour de lui. Le conseiller agricole, lui-aussi, doit faire évoluer ses compétences pour accompagner, s'il est jugé désirable, le déploiement des technologies agricoles. Sur l'exemple de l'outillage numérique, les conseillers ont la capacité de créer une connaissance hybride où leur connaissance des systèmes agricoles est combinée avec les résultats des outils numériques. Les conseillers peuvent alors jouer également le rôle d'intermédiaire entre l'agriculteur et les technologies numériques.

Ce développement de compétences ne doit pas se mettre en place sans un accompagnement plus large au changement. L'introduction de technologies dans les exploitations agricoles ne peut pas être considérée comme un simple ajout d'outils, toute chose étant égale par ailleurs. De nouveaux rôles sont configurés, de nouvelles expériences sont générées et les relations changent de nature. Le fait que les technologies agricoles puissent s'écarter considérablement des pratiques habituelles et générer des incertitudes dans la tête des conseillers déstabilise ou désécurise les rôles et les routines quotidiennes des acteurs, créant alors un impact sur ce qu'ils sont et ce qu'ils font. Les conseillers agricoles, en passant

⁵⁸ Chaire AgroTIC (2019). Se former au numérique. Quelles compétences acquérir pour les professionnels de l'agriculture ?

⁵⁹ Vivea (2020). Quelles compétences pour une agriculture numérique ? <https://vivea.fr/ressources/agriculture-numerique/>

⁶⁰ Nguyen, G. et al. (2020). "Strategic Outsourcing and Precision Agriculture: Towards a Silent Reorganization of Agricultural Production in France?" ASSA-AAEA 2020 – Annual Meeting of the Allied Social Sciences Association and the Agricultural and Applied Economics Association

⁶¹ Aspexit (2021). Agriculture & Numérique : prenons-nous vraiment la bonne direction ? <https://www.aspexit.com/agriculture-numerique-prenons-nous-vraiment-la-bonne-direction/>

⁶² Eastwood, Callum, Margaret Ayre, Ruth Nettle, and Brian Dela Rue. 2019. "Making Sense in the Cloud: Farm Advisory Services in a Smart Farming Future." NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences 90–91.

potentiellement de promoteurs de produits à promoteurs de services (services numériques, économie de la fonctionnalité, etc.) doivent faire sensiblement évoluer leurs messages et leurs façons de travailler. Et ces transformations sont d'autant plus à accompagner que le conseiller a et/ou aura des attributions complémentaires à considérer autour du bien-être animal, du dérèglement climatique ou plus largement du déploiement de pratiques agroécologiques.

B. Favoriser les croisements interdisciplinaires

Les innovations à venir ne seront peut-être pas tant technologiques mais viendront plutôt du croisement de compétences, entre des technologues, des ergonomes, des écologues, des designers, des modélisateurs, des agronomes, des généticiens, des écophysiologistes, ou encore des sociologues. Nous ne connaissons certainement pas encore l'écosystème complet nécessaire pour réaliser des projets innovants et nos idées sont peut-être limitées par un champ disciplinaire inconnu. **Il reste qu'il manque un cadre méthodologique pour travailler avec des compétences de différentes disciplines.**

La collaboration interdisciplinaire est plus facile à dire qu'à faire, surtout dans la mesure où les acteurs en place ont plus de difficulté à monter des projets transversaux qu'à l'intérieur même de leurs disciplines, ou qu'ils sont moins valorisés à trouver des croisements avec plusieurs thématiques que s'ils restent dans leur domaine de formation. **Ces collaborations pourront être facilitées avec des plateformes expérimentales communes et des bases de données centrales, une formation interdisciplinaire et une coopération et des réseaux institutionnels⁶³.**

C. L'adoption des technologies agricoles dans les fermes

La Grande Consultation des Agriculteurs⁶⁴, menée en parallèle des travaux sur l'Agriculture du Shift Project, a donné l'occasion aux agriculteurs et agricultrices d'évoquer leur positionnement au regard de certaines technologies agricoles. Même si les questions initiales étaient assez floues⁶⁵ et centrées sur quelques grandes catégories de technologies (Agriculture de précision [Robotisation, Digitalisation], Nouvelles Technologies Génomiques), il en ressort une diversité de réponses (respectivement 50% et 30% pour au moins « Oui » ou « Oui je l'ai déjà mis en œuvre » pour l'Agriculture de Précision et les Nouvelles Technologies Génomiques) **témoignant des différentes trajectoires technologiques possibles sur les fermes agricoles. Ces orientations variées sont le signe que, de la même façon que les systèmes de production agricoles et les voies d'écologisation sont multiples, les voies de technologisation couvrent un spectre large⁶⁶.**

L'adoption des technologies agricoles est un processus particulièrement complexe, dépendant de structures cognitives (parcours de vie, objectifs et préférences agricoles, etc),

⁶³ Storm, H. et al. (2024). Research priorities to leverage smart digital technologies for sustainable crop production. *European Journal of Agronomy*, 156.

⁶⁴ Grande consultation des agriculteurs, The Shift Project & The Shifters, Novembre 2024

⁶⁵ Question posée sur les technologies agricoles : En supposant que les pratiques ci-dessous soient financièrement rentables et que vous soyez accompagné(e) techniquement, quelles pratiques souhaiteriez-vous mettre en œuvre ?

⁶⁶ Schnebelin, Éléonore, Pierre Labarthe, and Jean-Marc Touzard. 2021. "How Digitalisation Interacts with Ecologisation? Perspectives from Actors of the French Agricultural Innovation System." *Journal of Rural Studies*. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0743016721002205>.

sociales (réseaux de collaborations, coopératives, etc.), et physiques (structure du parcellaire, localisation de l'exploitation) dans et autour des fermes agricoles. Les facteurs d'adoption des technologies sont souvent largement fragmentaires et manquent à rendre compte des dynamiques complexes d'adoption des technologies⁶⁷. **Il doit être clair que ce n'est pas parce qu'une technologie n'est pas adoptée qu'une exploitation agricole doit être considérée en retard de phase.** Une non-adoption peut être un choix totalement raisonné qui s'inscrit dans une trajectoire technologique et d'exploitation particulière.

Dans la mesure où les technologies devront s'adapter à des contextes et conditions locales, il sera intéressant d'aller identifier les systèmes en transition, sous la forme d'une traque aux innovations⁶⁸, dans lesquels des technologies agricoles sont utilisées à un rythme régulier et intégré dans le parcours de l'exploitation agricole.

⁶⁷ Pathak, Hari Sharan, Philip Brown, and Talitha Best. 2019. "A Systematic Literature Review of the Factors Affecting the Precision Agriculture Adoption Process." *Precision Agriculture* 20(6): 1292–1316.

⁶⁸ Salembier (2021). Stimuler la conception distribuée de systèmes agroécologiques par l'étude de pratiques innovantes d'agriculteur.rice.s. Thèse de doctorat.

Conclusion générale

Le développement et déploiement de technologies au service de la décarbonation et de l'adaptation du secteur agricole doit être planifié sur le long terme, en accord avec l'évolution des systèmes agricoles à venir. Des premières **mesures « sans regret »** doivent être considérées, laissant de côté les technologies jugées trop à risque ou incompatibles avec les objectifs de décarbonation du secteur, au moins en attendant qu'une analyse plus approfondie ait pu dissiper ces risques.

Les technologies agricoles doivent être rendues accessibles plus largement, et ce en particulier dans les filières technico-économiques les moins outillées qu'il semble souhaitable de soutenir, en mobilisant et en transférant des technologies et ressources (financières, organisationnelles, etc.) d'autres systèmes agricoles bien étudiés (voir section du rapport [« Cultiver l'hétérogénéité »](#)). Il faut appuyer les démarches collectives d'ouverture, d'auto-réparation ou encore d'open source (ex : Atelier Paysan⁶⁹, OS Farm⁷⁰, etc.), et limiter les logiques de brevetabilité et de concentrations monopolistiques. Ces démarches collectives seront d'autant plus à mettre d'atterrir si des standards et normes d'interopérabilité sont réellement suivies. La question des « communs » générés par les technologies agricoles (donnée numérique, variété résistante, etc.) doit être mise sur la table et bien instruite.

Les regroupements d'acteurs technologiques doivent être soutenus, si tant est qu'ils soient capables de démontrer qu'ils sont en mesure d'évaluer la pertinence des solutions technologiques qu'ils soutiennent au regard de la transition du secteur dans son ensemble. Ces organisations inter-acteurs doivent chercher à se diversifier pour favoriser des fertilisations croisées entre disciplines différentes.

Nous avons principalement proposé dans ce travail une lecture dynamique des technologies agricoles en ce sens que nous avons apporté des éléments de discussion sur la place des technologies pour accompagner la transition du secteur agricole. **La question de savoir si ces technologies auront toujours une place dans une agriculture qui aura réussi à se transformer est elle-aussi légitime** (on pourrait parler ici de la place des technologies en régime de croisière). Si des dépendances technologiques sont encore trop fortes dans les systèmes agricoles à venir, les crises qui pourraient impacter le fonctionnement des technologies (rupture de flux, limites énergétiques, etc.) influeraient en cascade sur notre relation avec les agro-écosystèmes. Il faut ainsi nous assurer que la capacité de résilience du système agricole est au centre de toute décision de déploiement d'innovation technologique.

Toutes ces questions doivent être au cœur des plans stratégiques français (PARSADA, PLOAA, SNBC3, etc) et des programmes d'équipements prioritaires de recherche (PEPR) et des grands défis associés en cours (PEPR Agroécologie et Numérique, PEPR Sélection Végétale Avancée, Grand défi biocontrôle et biostimulation, Grand Défi Robotique, etc.).

⁶⁹ <https://www.latelierpaysan.org/>

⁷⁰ <https://www.osfarm.org/fr/>

Références bibliographiques

Académie des technologies (2023). Avis de l'académie des technologies sur les nouvelles technologies génomiques appliquées aux plantes.

Ademe (2022). Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective. Evaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques.

Aspexit (2021). Agriculture & Numérique : prenons-nous vraiment la bonne direction ? <https://www.aspexit.com/agriculture-numerique-prenons-nous-vraiment-la-bonne-direction/>

Atelier Paysan (2021). Reprendre la terre aux machines. Manifeste pour une autonomie paysanne et alimentaire

Basic (2021). Filières agricoles et alimentaires. Enjeux et problématiques de la numérisation.

Bellon-Maurel et al. (2022). Digital revolution for the agroecological transition of food systems: A responsible research and innovation perspective. *Agricultural Systems*, 203, 103524.

Bournigal et al., (2015). 30 projets pour une agriculture compétitive et respectueuse de l'environnement. #AgricultureInnovation2025.

Carolan, 2020. "Acting like an Algorithm: Digital Farming Platforms and the Trajectories They (Need Not) Lock-In." *Agriculture and Human Values* 37(4): 1041–53

Caquet et al. (2020). Agroécologie – Des recherches pour la transition des filières et des territoires. Chapitre 6 : Contribution des agro-équipements et du numérique à l'agroécologie. Renforcer la prise en considération du vivant. Edition Quae.

Chaire AgroTIC (2019). Se former au numérique. Quelles compétences acquérir pour les professionnels de l'agriculture ?

Clapp, Jennifer, and Sarah Louise Ruder. 2020. "Precision Technologies for Agriculture: Digital Farming, Gene-Edited Crops, and the Politics of Sustainability." *Global Environmental Politics* 20(3): 49–69

De Wit, M.M. (2021). Can agroecology and CRISPR mix? The politics of complementarity and moving toward technology sovereignty. *Agriculture and Human Values*.

Duncan, Emily, Alesandros Glaros, Dennis Z. Ross, and Eric Nost. 2021. "New but for Whom? Discourses of Innovation in Precision Agriculture." *Agriculture and Human Values* (June). <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10244-8>.

Eastwood, Callum, Margaret Ayre, Ruth Nettle, and Brian Dela Rue. 2019. "Making Sense in the Cloud: Farm Advisory Services in a Smart Farming Future." *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences* 90–91.

Flandrin, L., and Verrax, F., (2019). Quelle éthique pour l'ingénieur ?. Editions Charles Léopold Mayer. 260p.

FNCUMA (2024). Plaidoyer pour une mécanisation responsable, durable et vivable de l'agriculture française. <https://www.cuma.fr/resource/plaidoyer-pour-une-mecanisation-responsable-durable-et-vivable-de-l-agriculture-francaise/>

Fressoz (2024). Sans Transition. Une nouvelle histoire de l'énergie. Essais Ecocène.

Gascuel-Oudou, C., et al. (2022). A research agenda for scaling up agroecology in European countries. *Agronomy for Sustainable Development*.

Harchaoui, S., and Chatzimpiros, P.(2018). Can Agriculture Balance Its Energy Consumption and Continue to Produce Food ? A Framework Assessing Energy Neutrality Applied to French Agriculture. *Sustainability*, 10

Higgins, V., et al. (2023). Deliberative assembling: Tinkering and farmer agency in precision agriculture implementation. *Journal of Rural Studies*, 100, 103023.

Huck, C., et al. (2024). Environmental assessment of digitalisation in agriculture : A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 472.

Inpact (2016). Innovation techniciste et course à l'endettement en agriculture : Pas d'agroécologie sans souveraineté technologique des paysans

Inrae (2023). État des connaissances sur la contribution des technologies d'édition du génome à l'amélioration des plantes pour la transition agroécologique et l'adaptation au changement climatique

Inria – Inrae (2022). Agriculture et Numérique. Tirer le meilleur du numérique pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables.

Jeuffroy, M.H., & Salembier, C. (2021). Innovations couplées pour la transition agroécologique. Séminaire ACT-AgroEcoSystem.

Klerkx, L., and Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, 24.

Klerkx, L., & Villalobos, P. (2024). Are AgriFoodTech start-ups the new drivers of food systems transformation? An overview of the state of the art and a research agenda. *Global Food Security*, 40.

Machenaud, G., et al. (2014). Agroéquipements et triple performance. Freins et leviers pour la transition énergétique. Abso Conseil. Étude commanditée par le Centre d'Études et de Prospective du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

La Rocca, et al., (2024). Estimating The Carbon Footprint Of Digital Agriculture Deployment: A Parametric Bottom-Up Modelling Approach. *Journal of Industrial Ecology*.

Lowenberg-Deboer, James, and Bruce Erickson. 2019. "Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption." *Agronomy Journal* 111(4): 1552–69

Martin, T., (2023). Les Sentinelles de l'Étable. Robotisation de la traite et nouvelle division du travail dans l'élevage laitier français. Thèse de Doctorat.

Nguyen, G. et al. (2020). "Strategic Outsourcing and Precision Agriculture: Towards a Silent Reorganization of Agricultural Production in France ?" ASSA-AAEA 2020 – Annual Meeting of the Allied Social Sciences Association and the Agricultural and Applied Economics Association.

OCDE (2018). Manuel d'Oslo.
https://www.oecd.org/fr/publications/2018/10/oslo-manual-2018_g1g9373b.html

Pathak, Hari Sharan, Philip Brown, and Talitha Best. 2019. "A Systematic Literature Review of the Factors Affecting the Precision Agriculture Adoption Process." *Precision Agriculture* 20(6): 1292–1316.

Pradel, M., et al. (2022). Comparative Life Cycle Assessment of intra-row and inter-row weeding practices using autonomous robot systems in French vineyards. *Science of the Total Environment*, 838.

Salembier (2021). Stimuler la conception distribuée de systèmes agroécologiques par l'étude de pratiques innovantes d'agriculteur.rice.s. Thèse de doctorat.

Schnebelin, Éléonore, Pierre Labarthe, and Jean-Marc Touzard. 2021. "How Digitalisation Interacts with Ecologisation? Perspectives from Actors of the French Agricultural Innovation System." *Journal of Rural Studies*. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0743016721002205>.

Stock, Ryan, and Maaz Gardezi. 2021. "Make Bloom and Let Wither: Biopolitics of Precision Agriculture at the Dawn of Surveillance Capitalism." *Geoforum* 122: 193–203.

Storm, H. et al. (2024). Research priorities to leverage smart digital technologies for sustainable crop production. *European Journal of Agronomy*, 156.

The Shift Project (2021). Pétrole : quels risques pour les approvisionnements de l'Europe ? <https://theshiftproject.org/article/nouveau-rapport-approvisionnement-petrolier-europe/>

The Shift Project (2022). Gaz naturel : quels risques pour l'approvisionnement de l'UE ? <https://theshiftproject.org/article/gaz-risques-approvisionnement-ue-rapport-shift-project/>

The Shift Project (2023). Planifier la décarbonation du système numérique en France. <https://theshiftproject.org/article/planifier-la-decarbonation-du-systeme-numerique-en-france-cahier-des-charges/>

The Shift Project (2023). Planifier la décarbonation du système numérique en France.

Vivea (2020). Quelles compétences pour une agriculture numérique ? <https://vivea.fr/ressources/agriculture-numerique/>

Visser, O., Sippel, S. R., & Thiemann, L. (2021). Imprecision farming? Examining the (in) accuracy and risks of digital agriculture. *Journal of Rural Studies*, 86, 623-632.

Zingsheim, M.L., & Doring, T.F. (2024). What weeding robots need to know about ecology. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, 364/

Annexes

Annexe 1 : Compléments sur la méthodologie de construction du panorama des technologies

Le cas du méthane est ainsi retiré de la matrice liée à la production végétale (même si nous pourrions quand même considérer les émissions de CH₄ indirectes via la production de carburants ou certaines productions agricoles comme la riziculture). Nous n'avons pas décliné ces matrices par filière même si ce travail plus fin aurait pu s'avérer pertinent. Certaines orientations technico-économiques des exploitations (OTEX) sont effectivement largement plus outillées que d'autres. **Nous ne soumettons pas ici de matrice dédiée à la polyculture-élevage.** Aussi importante que soit cette OTEX, il est manifeste que les technologies agricoles actuelles s'adressent en premier lieu à des filières plus étroites. Nous aurons l'occasion d'en reparler dans la suite du rapport.

Le panorama technologique proposé est relativement large. Il n'est néanmoins certainement pas exhaustif. La plus grande difficulté dans ce travail aura peut-être été d'attribuer une granularité cohérente à la fois entre des catégories de technologies sensiblement différentes mais aussi de manière à rendre la cartographie lisible et actionnable. **Les travaux**, à la fois ceux menés avec le groupe de travail et les ateliers réalisés en parallèle, **ont démontré l'hétérogénéité du vocabulaire et des représentations technologiques des participants. Les définitions des acteurs ne sont pas toujours communes et certains termes ne sont pas toujours précisément définis.**

Pour ne pas alourdir les matrices, les dimensions autour de la maturité et de la capacité de déploiement des technologies agricoles sur le terrain ne sont pas explicitées. Ces considérations sont plutôt discutées pour les technologies sélectionnées dans la suite du rapport. Des représentations sous la forme de courbes de Gartner ou d'échelles de maturité, accessibilité ou déployabilité (TRL [Technology Readiness Level] ou MRL [Market Readiness Level]) pourraient être complémentaires aux matrices que nous avons proposées. Une échelle de couleur supplémentaire pour exprimer ces dimensions n'a pas été jugée adaptée au vu de la taille déjà importance des matrices.

Annexe 2 : Matrices d'enjeux et Matrices des leviers associés aux innovations technologiques

Ces matrices viennent en complément des cas d'étude donnés plus haut.

A. Sélection conventionnelle

Technologies mobilisées (voir panorama) : de croisement ou d'hybridation naturelle du matériel génétique d'une plante ou d'un animal, marquage moléculaire, sélection génomique

<p style="text-align: center;">FORCES</p> <ul style="list-style-type: none"> • La sélection conventionnelle offre des capacités de brassages et de mélanges massifs de plantes qui a fait ses preuves. • La sélection conventionnelle offre la possibilité d'avoir des mélanges de variétés ou de génotypes • La sélection conventionnelle donne la capacité de faire de la sélection adaptée au sol & climat local • La sélection conventionnelle permet une adaptation progressive des plantes au changement climatique(delta faible) • Les expérimentations contrôlées de sélection sont réalisables à la ferme • Les technologies de sélection demandent peu de structures de coût supplémentaires (sauf si phénotypage haut débit) • La sélection conventionnelle est efficace pour améliorer les profils de variétés, surtout avec les méthodes modernes (marquage moléculaire, sélection génomique, etc.) 	<p style="text-align: center;">OPPORTUNITÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'acceptabilité sociale de la sélection conventionnelle est facilitée par rapport à d'autres approches d'édition génomique • Il y a une volonté de pousser le développement des légumineuses (non encore vraiment couvertes par la sélection)
<p style="text-align: center;">FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il reste difficile de sélectionner des critères pluri-dimensionnels en se projetant dans des scénarios climatiques futurs • Il manque beaucoup de travaux de recherche sur tout un tas d'espèces végétales encore trop peu considérées • Il est difficile de prédire le comportement d'une plante dans une condition qui n'a pas été testée • La sélection conventionnelle peut être chronophage • Les travaux de sélections passés conduisent à toujours utiliser des phytosanitaires mais les nouvelles orientations (amélioration de l'utilisation de l'azote, résistances aux maladies, etc.) commencent à incliner cette trajectoire. 	<p style="text-align: center;">MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le dérèglement climatique est trop rapide par rapport aux capacités de déploiement de la sélection • Il peut y avoir un risque d'intérêt privilégié pour les NTG, sans nécessairement de couplage avec la sélection conventionnelle • Les conditions de phénotypage sont de plus en plus complexes avec le dérèglement climatique (avec combinatoire important..) • Il peut manquer des débouchés pour les variétés sélectionnés (dans les systèmes agroindustriels par exemple) • Nous pourrions devenir dépendants de certains pays qui seraient les seuls à faire des céréales productives avec les dernières technologies disponibles. • Le potentiel d'une variété n'est révélée que si les pratiques culturales le permettent

Une matrice des leviers d'action pour exploiter les forces et opportunités de la sélection conventionnelle tout en limitant les faiblesses et menaces est présentée ci-dessous :

<p style="text-align: center;">STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS GRÂCE AUX POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • S'inspirer des variétés/espèces adaptées développées dans d'autres pays 	<p style="text-align: center;">STRATÉGIES DE PRÉVENTION DES MENACES GRÂCE À NOS POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Développer massivement des systèmes de partage de semences • Réglementer les échanges de
---	---

<ul style="list-style-type: none"> • Développer de nouvelles filières/débouchés de légumineuses (et autres) en France • Clarifier nos objectifs de développement alimentaire • Mettre en place des dispositifs de sélection participative sans se couper des outils technologiques modernes et de la variabilité génétique développée par les sélectionneurs • Fixer des objectifs de durabilité et de meilleure efficacité de l'azote pour les variétés 	<p>semences</p> <ul style="list-style-type: none"> • Créer des dispositifs de soutien au développement de la sélection sur les espèces protéagineuses
<p>STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS POUR MINIMISER LES FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Développer massivement le phénotypage sur les cultures non couvertes et thématiques orphelines • Mettre la sélection traditionnelle au service des besoins futurs (90% des plantes cultivées sont non irriguées donc besoin de travailler sur la non irrigation) • Orienter la sélection conventionnelle vers des variétés adaptées à des conditions toujours plus sèches • Intégrer la résilience dans les caractères sélectionnés • Adapter variétés à pratiques culturales à faible émissions (ACS, semis direct sous couvert) 	<p>STRATÉGIES VISANT À MINIMISER LES DANGERS POTENTIELS AU CROISEMENT ENTRE FAIBLESSE ET MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Organiser des débats citoyens sur la transition alimentaire

B. Agro-équipement paysan de désherbage mécanique

Technologies mobilisées (voir panorama) : agro-équipement multi-usage (désherbage, plantation, récolte, etc.), sous la forme d'un lit, pouvant accompagner des pratiques agroécologiques (semis sous couvert, etc).

<p style="text-align: center;">FORCES</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'agro-équipement paysan est généralement plus léger (moins de tassements de sol) • Cet agro-équipement permet de diminuer la pénibilité du travail de désherbage (notamment si allongé...) • L'agro-équipement paysan est adapté aux conditions de travail de l'agriculteur • L'agro-équipement paysan peut être rétrofitté • Ce type d'agro-équipement maintient du travail humain et l'emploi agricole • L'agro-équipement paysan est réparable facilement • Cet agro-équipement peut être fabriqué en autoconstruction (plans en open source, partage d'expérience). L'auto-construction revient moins cher économiquement • Il existe des communautés élargies pour favoriser l'échange de bonnes pratiques, l'amélioration et réparation du matériel • L'agro-équipement paysan peut être multi-usage (désherbage, plantation, récoltes) 	<p style="text-align: center;">OPPORTUNITÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'agro-équipement paysan permet de sortir de la dépendance forte aux constructeurs de machines dans le monde (voir les parts de marchés du matériel agricole) • L'agro-équipement paysan offre la possibilité de sortir de la dépendance à la matière et composants électroniques pour l'agro-équipement classique • Cet agro-équipement participe à l'attractivité du métier agricole grâce à la réduction de la pénibilité (TMS, ombrage et autres) • Cet agro-équipement peut accompagner le développement de structures à taille modeste et maraîchage agroécologiquement intensif • Cet agro-équipement peut accompagner le développement de nouveaux itinéraires cultureux qui étaient trop pénibles • Cet agro-équipement peut accompagner le développement du maraîchage diversifié sur petite surface
<p style="text-align: center;">FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • La construction et l'entretien de cet agro-équipement peut être chronophage • L'agro-équipement paysan conduit à une baisse du rendement par hectares et par humain • Cet agro-équipement est dépendant de flux physiques et de matières si assistance électrique • Les agriculteurs n'ont pas nécessairement l'envie ni la volonté partagée d'auto-construire leur matériel. 	<p style="text-align: center;">MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il peut être difficile de déployer massivement et en un temps limité ce genre d'agro-équipement • Les acteurs agricoles pourraient concentrer leur l'intérêt vers l'agro-équipement lourd et la robotique • Le contexte économique qui rend la main d'œuvre insuffisante & la dépendance à de la main d'œuvre (étrangère, stagiaire, woofers..) pourrait pousser à se désintéresser de ce genre d'agro-équipement • Il existe un préjugé d'archaïsme de ces technologies d'agro-équipement. Ces outils jugé trop inconfortables • Cet agro-équipement pourrait s'empiler avec l'agro-équipement déjà présent sur la ferme • L'augmentation du coût de l'alimentation liée à l'utilisation de ce genre d'agro-équipement pourrait ne pas être acceptée (coût de l'alimentation qui augmenterait) • Les politiques fiscales et comptables actuelles poussent au renouvellement

	des machines agricoles
--	------------------------

Une matrice des leviers d'action pour exploiter les forces et opportunités de l'agro-équipement paysan tout en limitant les faiblesses et menaces est présentée ci-dessous :

<p>STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS GRÂCE AUX POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produire des analyses environnementales et économiques comparatives entre agro-équipement paysan et agro-équipement classique • Documenter / mettre en avant les parts de marché, bénéfices et chiffres d'affaire des principaux constructeurs d'agro-équipement • Faire évoluer le matériel en fonction de l'ergonomie (morphologie, genre...) • Faire en sorte d'avoir suffisamment de retours d'expérience pour que les outils évoluent et se perfectionnent 	<p>STRATÉGIES DE PRÉVENTION DES MENACES GRÂCE À NOS POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Financer plus largement le déploiement ou lien avec des structures d'accompagnement à l'auto-réparation (fab-lab, repair-café, autres ateliers collectifs) • Orienter les aides financières directes (aide à l'acquisition de matériel) et indirectes vers ce type d'agro-équipement • Encourager l'emploi agricole et favoriser la rémunération des agriculteurs
<p>STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS POUR MINIMISER LES FAIBLESSES</p>	<p>STRATÉGIES VISANT À MINIMISER LES DANGERS POTENTIELS AU CROISEMENT ENTRE FAIBLESSE ET MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Déployer des formations / sensibilisations à l'auto-construction dans les formations VIVEA et formation continue (BPREA, lycée agricole, bac pro) • Proposer des modèles hybrides avec fabrication semi-industrialisée (outils en kit...) selon des plans open-sources et un cahier des charges facilitant l'auto-réparation/adaptation • Déployer des sessions d'essais, démonstration, initiation aux outils sur les salons régionaux • Faire plus largement connaître aux agriculteurs ce type d'agro-équipement (salons et autres..)

C. Robotique électrique de désherbage sélectif

Technologies mobilisées (voir panorama) : outil robotique léger, alimenté par de l'énergie électrique, pour assurer un désherbage sélectif localisé. Plusieurs voies de désherbage sont possible : UV, Thermique, Chimique, Mécanique, etc.

<p style="text-align: center;">FORCES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Certains robots sont légers (moins de tassements de sol) • Ces robots permettent de diminuer la pénibilité du travail de désherbage • Les robots de désherbage ouvrent la possibilité de faire du bio sans travail du sol • L'utilisation du robot peut libérer du temps de travail pour d'autres tâches (par exemple observer les parcelles en parallèle des activités robotiques) • Les robots peuvent potentiellement travailler à n'importe quelle heure de la journée • La filière robotique française est bien développée • Les passages réguliers de robots pour le désherbage (mécanique ou autre) peuvent limiter les phénomènes de résistance 	<p style="text-align: center;">OPPORTUNITÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> • La difficulté à trouver de la main d'oeuvre locale et qualifiée peut pousser à développer la filière robotique • La raréfaction des énergies fossiles et les difficultés d'approvisionnement énergétique peuvent orienter vers des robots électriques légers. • Les robots peuvent participer à augmenter l'attractivité du métier pour une partie des jeunes agriculteurs • Un Grand Défi Robotique⁷¹ (PEPR AgroEcologie & Numérique) est en cours • Des robots agiles et de petite taille peuvent avoir un potentiel pour favoriser l'atterrissage de trajectoires agroécologiques • L'utilisation de robots peut faciliter le déploiement d'itinéraires culturaux avancés agronomiquement si désherbage sélectif
<p style="text-align: center;">FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les robots de désherbage (et leurs caméras embarquées) n'ont pas la capacité à discriminer toutes les espèces sur les parcelles • Le coût d'investissement dans les outils robotiques peut être assez élevé • Les robots sont encore très monotâches (à relativiser sur les robots porte-outils) • Il y a encore très peu d'analyses en cycle de vie (ACV) sur la robotique (déplacement des robots entre parcelles, durée de vie des équipements, obsolescence...) • L'utilisation de robots peut appeler à un besoin supplémentaire de compétences pour faire fonctionner et réparer les robots • L'autonomie énergétique des robots n'est pas encore claire (Rechargement des batteries, raccordement au réseau...) • Les robots ne sont à l'heure actuelle pas encore totalement autonome (notamment pour cause réglementaire) • Les débits de chantier sont variables entre les robots (potentiellement faible) • Les robots ont encore peu de capacité à 	<p style="text-align: center;">MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les robots peuvent appeler à adapter des itinéraires culturaux au fonctionnement des robots & à standardiser des itinéraires agricoles • Les agriculteurs pourraient ne pas avoir la capacité à réparer leurs outils de travail (licences d'utilisation et d'exploitation, compétences nouvelles...) • Les robots peuvent participer à remplacer des ouvriers agricoles • L'achat de systèmes robotisés et les coûts cachés associés (maintenance, mises à jour...) pourrait aggraver l'endettement des fermes agricoles • Des cyber-attaques sur les unités robotiques (matériel, micro-logiciels, systèmes de communication) sont possibles. • Le robot pourrait venir se rajouter à l'agro-équipement existant et participer à un sur-empilement technologique. • L'acceptabilité du milieu agricole et des consommateurs d'itinéraires robotisés pour produire des aliments n'est pas garantie • On peut s'attendre à des Inégalités d'accès aux outils robotiques sur les territoires (zones blanches, exploitations

⁷¹ Grand Défi robotique - <https://anr.fr/ProjetIA-23-GDRA-0001>

<p>passer sur des systèmes de grandes cultures</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les robots ont besoin de conditions au champ relativement faciles pour fonctionner (pas de terrain trop accidenté, etc.) 	<p>isolées..)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Des défauts d'approvisionnement en puces électroniques pourraient impacter la filière robotique • L'utilisation de robots de désherbage pourrait participer à une perte de connaissance / savoir empirique sur les adventices locales • Les données collectées par les outils embarqués sur les robots pourraient être capturées par des prestataires et servir à la spéculation sur les denrées agricoles. • Des black out magnétique pourraient affecter les capacités de positionnement GNSS et de fonctionnement des robots
---	--

Une matrice des leviers d'action pour exploiter les forces et opportunités de la robotique électrique de désherbage tout en limitant les faiblesses et menaces est présentée ci-dessous :

<p>STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS GRÂCE AUX POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Privilégier le développement de robots légers (ex : flotte de robots) • Orienter le développement des robots pour limiter la pénibilité du travail (robots suiveurs, porte outils...) • Développer des robots multi-tâches 	<p>STRATÉGIES DE PRÉVENTION DES MENACES GRÂCE À NOS POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mettre en place des modèles de partage de robots (sous forme CUMA) [limité à cause du faible débit de chantier] • Accompagner les agriculteurs dans la réorganisation de leur travail autour du robot • Favoriser le développement de briques robotisées open-source • Industrialiser le déploiement des filières robotisées pour faire baisser le prix des robots • Développer des filières électroniques européennes pour limiter les chocs d'approvisionnement (puces ou autres) • Favoriser le développement de briques algorithmique (IA) et base de données open-source
<p>STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS POUR MINIMISER LES FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Accompagner la réglementation pour autonomiser l'action des robots au champ • Augmenter la robustesse / adaptabilité des robots dans les parcelles • Forcer le développement d'actions robotiques dans des itinéraires agroécologiques 	<p>STRATÉGIES VISANT À MINIMISER LES DANGERS POTENTIELS AU CROISEMENT ENTRE FAIBLESSE ET MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Développer les compétences en électronique / robotique des agriculteurs & concessionnaires • Sensibiliser les consommateurs sur la pénibilité du désherbage manuel • Trouver le juste niveau de technologie pour limiter les besoins en capteurs/puissance de calcul • Développer les filières de collectes et recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) • Encourager les design évolutifs, modulaire, réparable

D. Optimisation de l'alimentation animale

Technologies mobilisées (voir panorama) : Outils de modulation des rations alimentaires (concentrés et autres), Inhibiteurs de CH₄ entérique, etc.

<p style="text-align: center;">FORCES</p> <ul style="list-style-type: none"> Le bilan GES des systèmes d'élevages est assez clair (mais pas trop pour les co-produits et systèmes polyculture-élevage) L'identification individuelle des animaux est relativement simple (passeport et boucle individuelle des animaux même si tout n'est pas forcément connecté) Nous avons accès à des données massives et temporelles des états et consommations animales (mais mal pour les consommations en pâturage) Les technologies sont relativement matures et déployables Ces technologies s'insèrent dans un modèle agricole existant pour ceux qui utilisent déjà des minéraux et additifs (plus compliqué pour animaux à l'herbe) Le prix des technologies d'optimisation de l'alimentation animale n'est pas forcément exorbitant des technologies d'alimentation (additifs et autres) Il existe pas mal de références techniques sur l'utilisation de ces technologies : publications en ferme expérimentales, et proches des conditions terrain 	<p style="text-align: center;">OPPORTUNITÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> Le Methane Pledge Européen incite à s'intéresser au sujet des émissions de méthane. Les émissions de méthane dans le bilan GES agricole sont très importantes. Les agroindustries doivent être moteurs dans la réduction de leur scope 3 et ont intérêt à se tourner vers les émissions de méthane amont. La réduction des émissions de méthane pourrait avoir un potentiel de valorisation financière et extra-financière pour des filières d'élevage en difficulté (pérennité et image) Les technologies d'optimisation de l'alimentation animale pourraient permettre d'aller vers une meilleure connaissance des aliments en continu
<p style="text-align: center;">FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> Ces technologies sont principalement compatibles avec des animaux en bâtiment là où la ration est maîtrisée. Il n'y a pas toujours de modèle économique clair associé à ces technologies (qui paye...) Il n'y a pas assez de facteurs de réassurance (références GES et technico-économiques) La capacité des méthodes Cap2er à intégrer précisément toutes ces questions d'alimentation n'est pas claire. Il peut y avoir des contradictions possibles entre le bilan GES et le bien-être animal, voire des analyses en cycle de vie (ACV) plus larges Certaines de ces technologies peuvent être incompatibles avec certains cahiers des charges très exigeants Ces technologies peuvent faire porter un risque (faible) de blessures physiques Certaines de ces technologies peuvent 	<p style="text-align: center;">MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> Ces technologies pourraient participer à des effets rebonds dus à l'efficacité alimentaire (augmentation nombre d'animaux parce que moins d'émissions par animaux) Il y a un risque que ces technologies se concentrent sur les systèmes d'élevage intensifs et n'outillent pas d'autres filières animales (risques d'homogénéisation) Ces technologies imposent un maintien du besoin de protéines concentrées et questionnent donc l'origine de l'alimentation et de son bilan global Ces technologies pourraient participer à une tamagoshisation de la production animale et à réduire le bien-être animal aux observations facilement disponibles Ces technologies pourraient détourner les enjeux agronomiques vers des enjeux technologiques (tout faire pour ne pas baisser le cheptel) L'acceptabilité sociale de ces outils n'est pas garantie

<p>avoir des effets antagonistes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Une consommation de viande française qui ne diminue pas obligerait à se tourner vers des options technologiques et ne faciliterait pas la diminution de l’empreinte carbone des systèmes d’élevage. • La dépendance de la France aux importations de viande (au bilan GES moins propre qu’en France) pourrait limiter la capacité de la France à réduire son bilan GES • Les efforts de réduction du bilan GES de l’élevage français pourraient être limités parce que ce bilan est considéré bien meilleur qu’ailleurs • Risque de ne pas favoriser le maintien des prairies permanentes
---------------------------------------	--

Une matrice des leviers d’action pour exploiter les forces et opportunités de l’optimisation de l’alimentation animale tout en limitant les faiblesses et menaces est présentée ci-dessous :

<p>STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS GRÂCE AUX POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Enrichir la charte Duralim sur l’alimentation technologique • Rechercher des traits génétiques spécifiques à la méthanogenèse pour la sélection de races • Créer du lien entre les obligations réglementaires des filières (intra et inter filières) 	<p>STRATÉGIES DE PRÉVENTION DES MENACES GRÂCE À NOS POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Accompagner techniquement et financièrement des éleveurs dans leurs stratégies de décarbonation • Développer de filières végétales locales pour limiter les dépendances sur l’alimentation protéique lointaine • Expérimenter sur des fermes pilotes avant-gardistes & sur les systèmes d’élevage marginaux • Mettre en place des stratégies multi-échelles pour éviter des pertes/gains à différents entre les échelles
<p>STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS POUR MINIMISER LES FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recommander des technologies décarbonantes aux références certifiées dans des cahiers de charge • Mettre en place des plafonds d’émissions par vache ou système et ne pas tout rapporter à la surface ou à l’unité produite • Continuer à développer de référentiels techniques et économiques en conditions réelles 	<p>STRATÉGIES VISANT À MINIMISER LES DANGERS POTENTIELS AU CROISEMENT ENTRE FAIBLESSE ET MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mettre en place des obligations d’accès au pâturage pour les filières d’élevage

E. Production en environnement contrôlé

Technologies mobilisées (voir panorama) : Systèmes technologiques de production en environnement contrôlé⁷², servant plusieurs modèles de production différents (aquaponie, hydroponie, etc.)

<p style="text-align: center;">FORCES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ces technologies permettent une production intensive sur peu de surface • Ces technologies permettent une forte économie de certains intrants (phytosanitaires et eau notamment), une meilleure circularité et bouclage des intrants • Les plants sont moins sujets aux maladies, même s'ils sont replantés après • Ces technologies ont le potentiel de rapprocher les urbains de la production • Il existe de nombreux modèles différents de production en environnement contrôlé (aquaponie, hydroponie..) • Ces technologies ne sont que peu de saisonnalité et peuvent permettre ainsi d'embaucher de la main d'oeuvre sur des contrats longs. 	<p style="text-align: center;">OPPORTUNITÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ces technologies ont le potentiel de limiter la déforestation importée en produisant certaines productions directement sur place. • Ces technologies ont le potentiel de réduire les émissions évitées (ex : éviter d'utiliser les mangroves pour la crevetticulture) • Une production locale en environnement contrôlé pourrait permettre de réduire ou limiter des dépendances à d'autres pays (ex : lois votées par Inde et Maroc où limitations à l'exportation) • Ces systèmes offrent la possibilité d'aller chercher des génétiques anciennes ou variétés spécifiques (qui seraient trop sensibles en production à l'extérieur) • Les contraintes fortes imposées sur les consommations d'intrants (ex : Barcelone sur l'eau) peuvent pousser à développer ce type de technologies • Les risques de manque d'eau (plus importants que risques de chaleur) peuvent appeler à développer ce type de technologies économes.
<p style="text-align: center;">FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • La production avec ces systèmes est souvent contrainte pour certaines cultures (céréales etc) • Ces systèmes de production sont difficiles à passer à l'échelle • Ces technologies ne répondent pas nécessairement à un enjeu de sécurité alimentaire parce que peu de calories produites (mais libération de place et d'espaces agricoles) 	<p style="text-align: center;">MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Une concurrence est possible avec de l'alimentation plein champ • Ces technologies peuvent automatiser complètement des systèmes de production et impacter l'emploi agricole associé. • Un risque de concentration d'acteurs sur des macro-fermes en production contrôlé est possible (risque identique pour l'agriculture actuelle) • L'origine de l'alimentation des animaux d'élevage (aquaculture et autres) pour certains systèmes de production contrôlé est questionnable • L'acceptabilité sociale (agriculteurs et consommateurs) des productions en environnement contrôlé n'est pas garantie

Une matrice des leviers d'action pour exploiter les forces et opportunités de la production en environnement contrôlé tout en limitant les faiblesses et menaces est présentée ci-dessous :

⁷² Voir par exemple Agriloops, FarmCube, FuturaGaia

<p style="text-align: center;">STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS GRÂCE AUX POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Favoriser la production contrôlée d'espèces sensibles au dérèglement climatique • Maximiser la diversité génétique dans les serres • Faciliter l'installation des serres en zones urbaines et non habitables • Ne pas limiter l'agriculture verticale à un problème urbain 	<p style="text-align: center;">STRATÉGIES DE PRÉVENTION DES MENACES GRÂCE À NOS POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Soutenir financièrement des productions locales (surtout celles qui évitent les importations) • Mettre en place des systèmes de coopération intra et inter-filières entre les systèmes conventionnels et en serre • Faciliter l'installation de ces systèmes à des endroits où le modèle agricole conventionnel peine
<p style="text-align: center;">STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS POUR MINIMISER LES FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utiliser les serres pour tester l'adaptation des cultures à des stress supplémentaires • Réaliser des ACV complètes (notamment énergie) de ces types de production • Diffuser plus largement les ACV déjà réalisées 	<p style="text-align: center;">STRATÉGIES VISANT À MINIMISER LES DANGERS POTENTIELS AU CROISEMENT ENTRE FAIBLESSE ET MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensibiliser et faire connaître l'origine des produits actuellement consommés • Organiser des visites sur les sites de production en environnement contrôlé

F. Suivi numérique de ravageurs à l'échelle territoriale

Technologies mobilisées (voir panorama) : pièges connectés, stations météo connectées, approches participatives (crowdsourcing), technologie satellitaire, etc.

<p style="text-align: center;">FORCES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ces technologies de suivi privilégient la prévention et les échanges de bonnes pratiques • Ces technologies peuvent fonctionner en utilisant de réseaux bas débit et low tech (bas débit satellite qui arrive également) • La couverture spatialisée permises par ces technologies de surveillance est importante • Le piégeage connecté est plus qualitatif (avec relevé dynamique et fréquent) que le piégeage manuel • Les outils de piégeage sont abordables financièrement pour les acteurs agricoles • Les pièges et stations météorologiques sont déployables rapidement à grande échelle (mais difficulté à déployer un réseau dense) 	<p style="text-align: center;">OPPORTUNITÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> • De nouveaux ravageurs risquent d'arriver sur nos territoires et demanderont à être surveillés. • Les aires de répartition des insectes (insectes migrants et autres insectes) vont évoluer et demanderont à être mieux caractérisées. • Il y a un intérêt pour la connaissance et l'observation de certains insectes. Besoin d'un suivi régulier parce que les connaissances peuvent devenir obsolètes dans le temps. • La diminution des offres de pesticides et de puissance des solutions chimiques utilisées appellera à avoir une connaissance plus fine du suivi des ravageurs. • La numérisation des pièges pousse à s'intéresser au piégeage • Des retours d'expérience sont déjà disponibles avec les réseaux de pièges et stations météo installées • La création de liens forts entre différents acteurs du territoire est importante. L'utilisation de ces outils de suivi pourrait participer à favoriser ce lien.
<p style="text-align: center;">FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'utilisation de ces outils pour une surveillance territoriale demande une implication forte des participants. Besoin d'un réseau d'acteurs habitués à faire du suivi collectif • Il peut exister des limites dans la transférabilité des modèles de prévision à des échelles spatiales différentes • Les réseaux de pièges ne sont actuellement pas assez denses pour faire du suivi spatialisé • Les données de ces outils de suivi peuvent avoir des biais (de plusieurs types). Des outils d'intelligence artificielle (dans les pièges connectés par exemple) ont la capacité de limiter les biais et de filtrer les erreurs de diagnostic humain. • Les données sont parfois collectées à des échelles parfois trop larges (et pas forcément exploitables) qui ne permettent pas une prise de décision. • Les connaissances sur le développement des foyers de ravageurs et sur les dynamiques de population d'insectes sont limitées • Il y a un manque d'entomologue et de 	<p style="text-align: center;">MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il y a un risque de participation inégale sur le territoire et donc d'un essoufflement de certains acteurs impliqués (notamment si certains acteurs considèrent que leur risque ravageurs est faible). • Des acteurs pourraient avoir de mauvaises intentions dans l'utilisation des données (questionner la propriété et le partage de la donnée) • Ces outils de suivi pourraient rentrer en concurrence avec des outils déjà existants (type Bulletin Santé du Végétal ou autre) ou avec des acteurs aux intérêts divergents. • Les outils actuels n'offrent pas de prescription d'action post détection d'insectes parce que trop risqué et manque de compétences des fournisseurs d'outils numériques. • Il y a un risque de diriger les outils vers certains ravageurs plutôt que d'autres (pour des questions financières ou autres).

<ul style="list-style-type: none"> connaissances fines des insectes • La qualité des prédictions météorologiques dans le temps moyen / long peut être limitée • Le consentement à partager la donnée sur ce type de technologies de suivi collaboratif peut être limité. 	
---	--

Une matrice des leviers d'action pour exploiter les forces et opportunités des technologies de suivi de ravageurs à l'échelle territoriale tout en limitant les faiblesses et menaces est présentée ci-dessous :

<p>STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS GRÂCE AUX POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mettre en place des nudges pour favoriser les bonnes pratiques (et permettrait indirectement de réduire des IFT (Indices de Fréquence de Traitement) ou autre) • Financer des postes d'ingénierie territoriale / Facilitateurs • Créer des synergies de filières / territoires. • Définir des cadres de collaboration inter-acteurs du territoire (BSV, DREAL, filières etc.). Identifier les acteurs qui pourraient jouer le rôle de coordinateur • Créer des cartes spatio-temporelles dynamiques et accessibles des évolutions de ravageurs • Faciliter la remontée de données de pièges (ex : via crowdsourcing ou via opérateurs sur le terrain) 	<p>STRATÉGIES DE PRÉVENTION DES MENACES GRÂCE À NOS POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lancer des incitations financières pour que les acteurs participent aux réseaux de pièges • Démontrer l'intérêt à collaborer entre acteurs (ex : Centipede) et questionner les intérêts de chacun des acteurs en place (chercher les croisements ou superpositions d'intérêts) • Mettre les données BSV en Open Data, et sous forme spatialisée • Définir le cadre de partage des données et questionner le type de données devant être vues comme du « commun ». • Faciliter l'auto-construction des pièges connectés.
<p>STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS POUR MINIMISER LES FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cartographier les sites à risque de développement ravageurs suite au dérèglement climatique • Améliorer les capacités de détection pluri-spécifiques des pièges et modèles • Augmenter le pool d'entomologues dans les équipes de recherche et développement d'outils Agritech • Améliorer la modélisation du développement des ravageurs avec le dérèglement climatique (et faire évoluer modèles parce que basés sur contextes climatiques anciens) 	<p>STRATÉGIES VISANT À MINIMISER LES DANGERS POTENTIELS AU CROISEMENT ENTRE FAIBLESSE ET MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réfléchir le nombre de capteurs et les architectures informatiques pour limiter l'empreinte carbone totale du suivi • Déployer massivement des capteurs low-tech.

The Shift Project est un think tank qui oeuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, notre mission est d'éclairer et d'influencer le débat sur la transition énergétique en Europe. Nos membres sont de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité.
www.theshiftproject.org

Contact :

Corentin Leroux

Pilote du Groupe de travail
« Technologies agricoles » - Aspexit

cleroux@aspexit

