

La place de la technologie dans la transition agricole

COMMENT EVALUER LA CAPACITE DES TECHNOLOGIES AGRICOLES A ACCOMPAGNER LA TRANSITION ?	128
1. Qu'entend-t-on par technologie agricole ?	128
2. Un premier pas de côté	129
A. Penser le lien entre les technologies agricoles et la transition énergie-climat de l'agriculture	130
B. Un faux sentiment de neutralité des technologies agricoles	133
3. Approche méthodologique	134
Un panorama des innovations technologiques en agriculture	135
A. Méthodologie de construction de la cartographie des technologies	135
B. Décryptage du panorama technologique	140
Sélection des innovations technologiques	143
Description détaillée des innovations technologiques	145
A. Proposition méthodologique d'explicitation des technologies agricoles	145
B. Évaluation de deux innovations technologiques	146
Projection des innovations technologiques dans des personas agricoles	153
A. L'exemple de la robotique électrique de désherbage sélectif	154
B. L'exemple de la sélection conventionnelle	158
Matrices SWOT et Matrices des leviers associés aux innovations technologiques	162
A. Sélection conventionnelle.....	162
B. Agro-équipement paysan de désherbage mécanique	164
C. Robotique électrique de désherbage sélectif	166
D. Optimisation de l'alimentation animale.....	168
E. Production en environnement contrôlé	170
ANNEXES	172
Annexe 1 : Cartographie des flux actuels de biomasse en France – en MtMS.....	173
Annexe 2 : Indicateurs de bilan français des principales filières agricoles et agroalimentaires en volumes (Source France Agrimer).....	174
Annexe 3 : Emissions moyennes de GES par type de biocarburant	174
Annexe 4 : Tableau des leviers.....	175
Références	178

Comment évaluer la capacité des technologies agricoles à accompagner la transition ?

L'objectif de ce chapitre est de **proposer une méthodologie** permettant de **décrypter les technologies agricoles** disponibles dans leur capacité à accompagner la transition du secteur. **Ce chapitre s'inscrit pleinement dans le rapport Agriculture** en ce sens que des leviers technologiques y sont parfois proposés ou au moins mentionnés.

Après une première discussion générale autour de l'enjeu des technologies agricoles et un panorama large des technologies pouvant accompagner la décarbonation et l'adaptation du secteur agricole, nous avons sélectionné un lot de technologies variées que nous avons passées au crible. En suivant une approche pas à pas, **chaque technologie agricole est étudiée** (impacts, enjeux, dépendances, verrouillages...) **et projetée dans des personas agricoles pour mieux questionner leur atterrissage sur le terrain.**

Une des prochaines étapes de ce chapitre sera d'évaluer à quel point les trajectoires proposées dans le rapport Agriculture orientent ou non le développement des technologies agricoles dans une direction donnée.

1. Qu'entend-t-on par technologie agricole ?

Qu'est-ce que la technologie ? Il serait hasardeux voire dangereux 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**. 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.

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 ²⁷⁰ « 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). Le financement des technologies AgriTech et Biotech 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. Il importe donc d'identifier pleinement les enjeux qu'elles soulèvent afin d'opérer des arbitrages éclairés, et de définir des politiques publiques adéquates

Il a été souvent question d'intégrer la notion de pratiques agricoles dans le périmètre de ce travail. Pour éviter atermoiements 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 présentées plus largement plus haut dans le rapport.

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.

2. Un premier pas de côté

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 qui apporteraient des contraintes supplémentaires à un secteur qui affronte déjà beaucoup.

La réflexion poursuivie dans le cadre de ce groupe de travail ne vise pas à empêcher 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 créateurs de tensions et appuyant des oppositions parfois idéologiques.

²⁷⁰ 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>

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 solutions²⁷¹ ²⁷², 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.

A. Penser le lien entre les technologies agricoles et la transition énergie-climat de l'agriculture

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 au champ 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...).

Malgré tout, les apports des années passées des technologies agricoles ne peuvent pas être considérées toutes choses égales par ailleurs au vu de la double contrainte carbone à laquelle le secteur agricole fait face.

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 démontrer²⁷⁴. 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 risque²⁷⁵. Ces 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 la suite de ce rapport, **nous parlerons 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

²⁷¹ Bournigal et al., (2015). 30 projets pour une agriculture compétitive et respectueuse de l'environnement. #AgricultureInnovation2025.

²⁷² 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

²⁷³ Inria – Inrae (2022). Agriculture et Numérique. Tirer le meilleur du numérique pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables.

²⁷⁴ 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

²⁷⁵ 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/>

de ferme est hétérogène²⁷⁶, fonction d'une multitude de facteurs historiques, sociologiques, techniques ou encore financiers²⁷⁷. Rajoutons également que certaines technologies pourront être adaptées à certaines situations mais délétères dans d'autres (exemple de l'agrivoltisme). 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 technologique²⁷⁸ et de dépendance au sentier²⁷⁹**). 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 stockeur) **qui sont susceptibles d'émerger²⁸⁰**.

Ici alors, **le concept de technologie appropriée²⁸¹**, avec le double sens de l'appropriation par l'utilisateur ou l'usagère est 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 enchevêtrées. 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 rebond²⁸² ou d'empilement technologique continuent à être documentés²⁸³**. **L'agriculture n'y fait pas exception**. Certains arguments discutés tout au long de ce rapport ne sont pas nécessairement spécifiques à une technologie en tant que telle.

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 agro-écologiques**, 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.

²⁷⁶ Lowenberg-Deboer, James, and Bruce Erickson. 2019. "Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption." *Agronomy Journal* 111(4): 1552–69

²⁷⁷ 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.

²⁷⁸ 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

²⁷⁹ 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

²⁸⁰ 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>.

²⁸¹ Atelier Paysan (2021). Reprendre la terre aux machines. Manifeste pour une autonomie paysanne et alimentaire

²⁸² The Shift Project (2023). Planifier la décarbonation du système numérique en France.

²⁸³ Fressoz (2024). Sans Transition. Une nouvelle histoire de l'énergie. Essais Ecocène.

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 dans le débat (principalement sous l'angle d'une optimisation, cf plus haut). En particulier, **l'empreinte environnementale de ces technologies elles-mêmes est rarement évoquée, et très rarement mesurée ni 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 matérielle des technologies – pensons aux outils numériques, à l'agro-équipement ou encore à la robotique, commence à être documentée²⁸⁴ et ne peut plus être négligée.

Comment penser les technologies agricoles sur les autels 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 azoté ont par exemple été développés pour fournir des préconisations azotées 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 largement optimisées est-il une réponse suffisante ? 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 à quel point cette technologie a besoin d'être déployée à son plein potentiel** 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.

²⁸⁴ 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.
Ademe (2022). Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective. Evaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques.

B. Un faux sentiment de neutralité 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 abstraites de leurs réseaux, pratiques, affects et discours. Les dispositifs technologiques ne sont jamais de simples objets indépendants ; ils sont toujours relationnels dans leur essence. Il est peut-être 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 gravitent dans l'écosystème technologique en agriculture doivent se responsabiliser** et garder en tête qu'ils ont tous eu 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 négatives.

Nous pourrions aller jusqu'à parler de **fractures d'exactitude et de précision**²⁸⁵ en ce sens que les technologies ne sont pas toujours adaptées voire même pensées pour tous les itinéraires agricoles. Nous ne mesurons, supervisons ou encore évaluons que ce que nous voyons et il est ainsi souvent plus facile de modéliser le monde d'une manière simpliste, soit parce que nous n'avons pas les outils technologiques pour mesurer ce qui aurait dû l'être, ou parce que nous ne savons pas ce que nous recherchons. Certains pans agricoles sont effectivement laissés en partie de côté par les technologies agricoles (polyculture-élevage, légumineuses, agriculture biologique...), pour des raisons financières principalement mais aussi réglementaires ou encore pour des enjeux d'organisation de filières ou de débouchés. En évitant des oppositions franches entre situations agricoles, n'est-ce pas au contraire tout une diversité et une hétérogénéité de systèmes agricoles qu'il faudrait reconquérir ?

Les technologies n'entrent pas dans les exploitations agricoles toutes choses égales par ailleurs.

L'adoption des technologies est un processus long et progressif, fait parfois d'allers-retours, et qui engage très largement à la fois les agriculteurs sur le terrain mais aussi tous leurs 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 compétences à acquérir et de l'accompagnement au changement à réaliser. 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 jeu²⁸⁶. 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 de parer à la profonde incertitude et 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 lui²⁸⁷. L'agriculteur innovateur, fêré 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

²⁸⁵ 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.

²⁸⁶ 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>.

²⁸⁷ Caquet et al. (2021). *Agroécologie - Des recherches pour la transition des filières et des territoires*. Chapitre 6 : Contribution des agro-équipements et du numérique à l'agro-écologie. Renforcer la prise en considération du vivant. Edition Quae.

même opposé, aux innovations technologiques de son secteur, ce dernier étant plutôt perçu comme retardataire.

Ce bruit 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 SADEA, 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, l'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 renouvellement d'outils sont privilégiés (voir précédente section et discussions à venir sur les innovations technologies sélectionnées). Les dispositifs financiers, encore très orientés vers l'innovation 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 auxquelles nous tenterons d'amener des éléments de discussion.

3. Approche méthodologique

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 cinq 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. Il sera amené à être consolidé par le retour de contributrices et contributeurs après la lecture de ce rapport intermédiaire. Dans la deuxième partie du rapport, un échantillon de réponses technologiques est sélectionné pour la suite du travail. La section explicite les critères et raisons de ces choix technologiques. La troisième section tente de détailler avec finesse les technologies sélectionnées. 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. La quatrième partie du rapport invoque des personas agricoles de manière à projeter les réponses technologiques choisies dans des cadres plus concrets. L'objectif n'est en rien de mettre les agricultrices et agriculteurs dans des cases mais bien de discuter de l'adéquation entre les technologies agricoles et la réalité du terrain dans sa diversité. La dernière partie de ce document raccroche ce livrable au reste du rapport Agriculture du Shift Project en tentant de discuter des interactions entre les projections détaillées du Shift Project et les technologies agricoles.

Un panorama des innovations technologiques en agriculture

A. 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.** L'axe d'itinéraire agricole est suffisamment large pour ne pas écarter des filières ou des systèmes de culture particulier, 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. 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 CH_4 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. Des contributions complémentaires, suite à la publication du rapport intermédiaire, viendront nourrir cette cartographie. 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 déployabilité 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.

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 transformées 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 les 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).

Les technologies agricoles en lien avec la thématique énergétique (méthanisation, petit éolien, agrivoltaïsme, décarbonation des engrais minéraux azotés...) 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 à la fin 2025. **Un travail préalable est en cours sur le secteur de l'Agriculture et donnera lieu à une position réaffirmée à la fin 2024**

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.

	Semer et Planter	Éviter la concurrence des autres plantes	Nourrir la plante et le sol	Protéger et Soigner la plante	Récolte et post récolte
Adaptation au changement climatique	Sélection génétique (dont NBT., Mutagénèse, sélection conventionnelle...), géo-positionnement RTK pour schéma de cultures spécifiques, 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 agro-écologiques				
	Simulateurs d'assolements et rotations, Outils numérique d'aide aux choix des couverts et systèmes de culture		Scoring des pratiques agricoles, Irrigation de Précision (compteurs connectés, bilan hydrique semi-automatisés...)	Bioestimulants, Biocontrôle, Agrivoltaïsme, Outils de modélisation de gestion intégrée des cultures, Crowdsourcing de nouvelles maladies émergentes	
Séquestrer et limiter le déstockage de CO₂	Suivi satellitaire (cultures intermédiaires, infrastructures agro-écologiques...)	Désherbage sélectifs (thermique, électrique, UV...), Désherbage non sélectifs appliqués de manière précise	Génétique & Exsudats racinaires, Bioestimulants & 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/céréales fixatrices d'azote (dont NBT,, Mutagénèse, 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

Tableau 11 : Innovations technologiques en production végétale

	Gestion de la reproduction	Alimentation et Abreuvement	Etat et propreté des bâtiments	Protéger et Soigner les animaux	Collecte et Abattage
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 valeur alimentaire herbe		Suivi temps réel du stress thermique des animaux	
Séquestrer et limiter le déstockage de CO₂		Suivi satellitaire de l'état des prairies			
Limiter émissions de CH₄	Diagnostic CAP2ER, Sélection génétique (dont sélection conventionnelle, NBT...)				
	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, Pilules robotiques pour suivi interne de la méthanogénèse, Masques à méthane, Génétique de l'holobionte, Diminution de la part de lipides insaturés dans les rations			
Limiter émissions de N₂O					
		Réduction des apports protéiques	Couverture des fosses, Évacuation directe des lisiers		

Tableau 12 : Innovations technologiques en production animale

B. Décryptage du panorama technologique

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, si les innovations technologiques sont jugées pertinentes, 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 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 fines 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...)

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), 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 agro-écologiques). 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 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 contrôlé type serre [voir un des innovations 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 génétique 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 paramétriques). 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), 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 pour augmenter la résistance des plantes, agrivoltaïsme pour protéger contre les effets de stress thermique...)

Plus particulièrement en production animale :

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 antiméthanogènes, 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 utilisés pour réduire l'âge

du premier vêlage et optimiser les taux de renouvellement du cheptel, participant ainsi au global à une réduction de l'empreinte unitaire de la production animale.

Comme discuté en introduction, **nous retrouvons ici relativement peu de technologies adaptées à des systèmes de polyculture-élevage**. Les technologies de suivi de la biomasse ou de pratiques agro-écologiques (infrastructures agro-écologiques 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 certaines). Attention néanmoins à certains outils comme les NBT qui ne sont pas autorisés en Europe en élevage. 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...).

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 contrepoint de packages de solutions technologiques.

Certaines technologies choisies pourront apparaître contradictoires entre elles (par exemple les nouvelles technologies génomiques et la sélection conventionnelle classique). Ce n'est pas notre intention première. 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 9 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 intéressés aux annexes. La raison principale du choix de cette technologie 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 GES agricoles.
2. **Nouvelles technologies génomiques [NBT]** : pour alimenter le débat sur des technologies controversées.
3. **Sélection conventionnelle [SC]** : Pour mettre en avant des fractures existantes sur certaines filières délaissées par la sélection conventionnelle classique au profit de technologies génétiques plus *high tech* (Nouvelles technologies génomiques...).
4. **Agro-équipement paysan pour désherbage mécanique [AEP]** : pour discuter de technologies sobres et frugales, en contrepoint 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 Robotique 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 parce que 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.
9. **Biostimulation [BS]** : pour discuter de technologies aux co-bénéfices larges, considérées comme naturelles et plus acceptables socialement.

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	NBT	SC	AEP	ROB	ALIM	NUM	PEC	BS
Dédié à la décarbonation	✓	✗	✗	-	-	✓	✗	-	-
Dédié à l'adaptation	✗	✓	✓	✓	-	✗	✓	✓	✓
Avec warning ou controversée	✗	✓	✗	✗	-	✓	✗	✗	✗
Mature et déployable	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Peut générer des ruptures	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Capacité à avoir des données quantitatives d'impact	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	-
Avec thématiques orphelines	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	-
Considérée comme low-tech	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✓	✗	-

Tableau 13 : Catégorisation des innovations technologiques sélectionnées suivant un lot de critères.

Légende : ✓ (Oui) ; ✗ (Non) ; - (Mitigé)

Description détaillée des innovations technologiques

A. Proposition méthodologique d'explicitation des technologies agricoles

Cette section a pour objectif principal de mettre en avant les arbitrages à réaliser avant la mise en œuvre de technologies agricoles sur le terrain. Ces arbitrages seront majoritairement discutés au travers du triptyque énergie / émissions / emploi, représentatif de l'approche générale du Shift Project. Par souci de simplification et parce que le rapport a une visée méthodologique, nous ne détaillerons ici que deux innovations technologiques précédemment identifiés. Nous renvoyons les lectrices et lecteurs intéressés vers les annexes. L'approche pourra être redéployée pour chaque technologie agricole envisagée.

La description des innovations technologiques est découpée en quatre étapes :

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 le Shift Project prend cause pour la double contrainte carbone 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'approvisionnements...) et les risques portés sur l'utilisation des technologies agricoles sur le terrain.

Une troisième étape consiste à élargir le spectre de la réflexion et à poser le cadre d'un atterrissage des technologies agricoles sur le terrain. Les matrices élaborées sont certainement l'apport principal de cette section.

- Une première matrice SWOT matérialise de 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.
- Une seconde matrice 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.

Ces matrices sont l'occasion d'interroger ce qui se passerait sur les systèmes et schémas agricoles si les technologies étaient déployées à une échelle large, 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. Évaluation de deux innovations technologiques

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

Si vous avez des expertises complémentaires à partager sur l'optimisation des apports azotés dans l'ensemble de ces sections, merci de nous contacter à cleroux@aspexit.com

• 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, ou encore,
- 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. Diminution des GES dus à la production et transport des engrais de synthèse

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 effets de serre et/ou d'adaptation au changement climatique : A-t-on des chiffrages disponibles et parcimonieux ? Potentielle

difficulté à chiffrer l'atténuation au vu de la diversité des outils disponibles²⁸⁸ et de leur fonctionnement.

Si vous avez des chiffrages sourcés autour du potentiel d'atténuation et/ou d'adaptation, merci de nous contacter à cleroux@aspexit.com

- **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 tous les flux de matières pour les fabriquer.

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.

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 azotés 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 de technologies différentes. demandant alors des infrastructures réseaux ou des communications satellitaires.

L'application de l'apport azoté depuis l'agroéquipement 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 élargi pour l'opération culturale

²⁸⁸ <https://www.aspexit.com/le-raisonnement-de-la-fertilisation-azotee-par-les-outils-numeriques-une-amourette-assez-fragile/>

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

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

FORCES

- Beaucoup d'outils numériques de raisonnement de la fertilisation azotée
- Des nouveaux modèles disponibles de pilotage intégral de l'azote
- Connaissance des bonnes fenêtres d'application de l'azote
- Beaucoup de références techniques disponibles
- Technologies matures sur certaines filières

OPPORTUNITÉS

- Aides à l'investissement existent sur du matériel agricole et outils numériques
- Utilisation des outils numériques de pilotage azoté pour certains labels et cahiers des charges (ex : HVE)
- Réduction importantes d'azote demandés dans le cadre de politiques françaises et européennes
- Offres de service disponibles chez les acteurs de terrain
- Augmentation du coût des engrais azotés
- Part importante du N₂O dans l'empreinte de l'agriculture

FAIBLESSES

- Package technique coûteux si tout est utilisé
- Modèles azotés particulièrement adaptés à certaines cultures en particulier et peuplements monospécifiques
- Besoin d'interopérabilité forte (pour les cartes de préconisation, entre tracteurs et rampes de pulvérisation...)
- Encore peu d'utilisation d'outils de pilotage azoté sur le terrain
- Latence parfois importante entre demande et réception de cartes de préconisation azotées
- Beaucoup d'outils différents de pilotage qui ne font en réalité pas la même chose
- Utilisation détournée des outils de pilotage pour déplaçonner les doses réglementaires d'apport

MENACES

- Fracture de précision entre systèmes de cultures outillés et d'autres non outillés
- Endettement des agriculteurs pour acheter l'ensemble du package technologique
- Souveraineté énergétique de la France sur le gaz pour la fabrication des engrais azotés
- Optimisation renforcée du modèle agricole dominant
- Ralentissement du développement de pratiques alternatives (semis direct sous couvert permanent, plantes compagnes...)

Une matrice des leviers et stratégies 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>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 (COMIFER) • Élargir les expérimentations avec des outils de pilotage azoté en conditions opérationnelles d'agriculteurs 	<p>STRATÉGIES DE PRÉVENTION DES MENACES GRÂCE À NOS POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Développer des modèles de préconisation azotée sur des cultures plus diversifiées • rendre accessible un apport low-tech d'azote (bonne fenêtre d'application, modulation manuelle par localisation smartphone...) • Accompagner financièrement les agriculteurs sur des outils de pilotage azoté sous obligation de résultats
<p>STRATÉGIES POUR EXPLOITER LES OPPORTUNITÉS POUR MINIMISER LES FAIBLESSES</p> <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 / SAV 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 	<p>STRATÉGIES VISANT À MINIMISER LES DANGERS POTENTIELS AU CROISEMENT ENTRE FAIBLESSE ET MENACES</p> <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 vente et 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 ou NBT 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
- ...

2. L'exemple des nouvelles technologies génomiques

Si vous avez des expertises complémentaires à partager sur les nouvelles technologies génomiques dans l'ensemble de ces sections, merci de nous contacter à cleroux@aspexit.com

- **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 gène (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. Ces nouvelles technologies génomiques se distinguent d'autres technologies agricoles comme la sélection conventionnelle (voir autre pari technologique étudié), la mutagénèse, 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 (moins de fuel), Facilitation du désherbage (herbicides). Réduction de l'usage de produits phytosanitaires (sélection de résistances à certains ravageurs/maladies).

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. Maintien d'une diversité de filières alimentaires (conventionnelle, bio, sans OGM, 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.

Potentiel d'atténuation des émissions de gaz à effets de serre et/ou d'adaptation au changement climatique : Très difficile à quantifier. Dépendra de l'orientation de la sélection et de la réalité des promesses.

Si vous avez des chiffrages sourcés autour du potentiel d'atténuation et/ou d'adaptation, merci de nous contacter à cleroux@aspexit.com

- **Dépendances technologiques et flux physiques associés**

Outre le développement de laboratoires de recherche et le besoin en séquenceurs 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 technologies d'optimisation azotés**

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

<p style="text-align: center;">FORCES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilisée en routine dans la recherche fondamentale • Capacité à lier des allèles favorables avec des traits favorables (aiguille de précision) • Potentiel à long terme de développer des variétés adaptées au dérèglement climatique • Permet d'acquérir de la connaissance transversale entre les espèces • Théoriquement possible de reproduire les mêmes modifications qu'avec la sélection classique • Potentiellement plus rapide que la sélection à l'échelle d'un caractère mais pas forcément à l'échelle plus globale de la sélection ou pour des mutations isolées • Capacité à produire des traits entièrement nouveaux (ou nouveaux dans la variété) 	<p style="text-align: center;">OPPORTUNITÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dynamique mondiale sur les NBT (mais hétérogène entre pays) • Retours d'expériences disponibles sur les OGM • Le changement climatique (et sa rapidité) augmente les attentes des technologies NBT - cristallisation au niveau de la sélection • Connaissance fine du génome de certaines plantes • Intelligence artificielle et modélisation de la structure des protéines
<p style="text-align: center;">FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technologie pas au pic de sa maturité technologique • Difficulté à organiser la traçabilité sur l'entièreté de la chaîne agri-agro • Difficulté à connaître le potentiel optimum d'une plante dans le futur • Connaissance hétérogène du génome des plantes • Plus difficile de cibler des critères en lien avec le changement climatique parce qu'énormément de gènes • Non réalisable à la ferme et demande des outils R&D développés (labo et autres) • Demande de R&D et financement importante • Risques sanitaires potentiels liés à l'utilisation des outils de modification du génome (effets off-target et on-target, allergénicité, toxicité...) • Risques environnementaux potentiels (effets invasifs, flux de gènes, déstabilisation des écosystèmes..) 	<p style="text-align: center;">MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Brevetabilité augmentée et manque d'accès étendu aux solutions • Concentration du secteur des semences • Actuellement tributaire des technologies développées à l'étranger • Risque de maladaptation en fonction des traits développés • Pénurie d'outils de modification génétique pour la R&D • Reproduction des travers des productions OGM et systèmes de vente associés • R&D orientée vers des pratiques / espèces spécifiques non durables (opportunités financières ou autres) • Acceptabilité sociale des NGT

Une matrice des leviers et stratégies 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 important du marché aux USA) • Orienter le développement des NGT vers les besoins en décarbonation • Bloquer le développement des NGT vers des variétés tolérantes aux herbicides 	<p style="text-align: center;">STRATÉGIES DE PRÉVENTION DES MENACES GRÂCE À NOS POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Définition d'un cadre réglementaire empêchant la vente conjuguée de NBT et pesticides, et limitant le développement des VTH • 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 style="text-align: center;">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 maintenir un haut niveau de sécurité sanitaire et environnementale 	<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"> • Prévoir un suivi (monitoring) des effets sanitaires, environnementaux et socio-économiques des NTG • Organisation d'un débat large avec l'ensemble de la société sur l'opportunité d'utiliser ou non les NGT • Définition d'un cadre réglementaire qui permette une information du consommateur

• **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 ou en fermes expérimentales). La capacité des plantes éditées par les NBT 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 ou non avec des outils moins sophistiqués de sélection conventionnelle (voir autre pari technologique) dépendra des orientations données aux NGT. Il faut considérer dans ce cas précis que c'est bien le progrès génétique mesuré et quantifié qui a permis également d'améliorer la sélection conventionnelle (via catalogue).

Projection des innovations technologiques dans des personas agricoles

Pour donner plus de concret aux descriptions technologiques précédentes, nous proposons d'interroger la mise en œuvre technologique sur le terrain au travers de personas. Ces personas 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. **L'idée n'est pas de projeter les technologies dans ce à quoi les fermes agricoles françaises pourraient ressembler à un horizon 2050 (ou tout du moins pas pour l'instant) mais plutôt de partir du scénario agricole actuel français.**

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 personas à imposer un carcan aux agricultrices et agriculteurs. **Ces personas sont poreux et les trajectoires entre personas 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 persona 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 personas, les technologies sont discutées sous l'angle de trois considérations agricoles principales: la structure et taille de l'exploitation, la localisation de l'exploitation, et les pratiques agricoles sur l'exploitation. Ces 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 personas agricoles et des technologies. Pour discuter de l'adéquation des innovations technologiques à des contextes agricoles, nous proposons à chaque fois de lister un certain nombre de critères pour tenter d'élargir le débat au maximum.

À la suite des ateliers réalisés, nous nous sommes rendu compte que la discussion autour d'une seule liste de critères paraissait plus fluide pour certaines technologies vouées à être utilisées par les agriculteur-ices 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...). Ces considérations ont pu nous amener à faire parfois évoluer un peu les personas ou les critères de discussion.

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. Les robots sont ici 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 morcellement parcellaire 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	Outil robotique plus difficile à amortir sur des petites surfaces et des petites exploitations très diversifiées. Robots difficile 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.
	Etat du matériel déjà existant sur l'exploitation	Se rajoute à l'agro-équipement existant (au tracteur, notamment pour 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 maraichage). Potentielle attractivité d'outils robotiques pour agris 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 difficile (pluie, pente, canicules...)?
	Proximité avec réseaux d'énergie	Besoin d'une ou plusieurs sources électrique 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

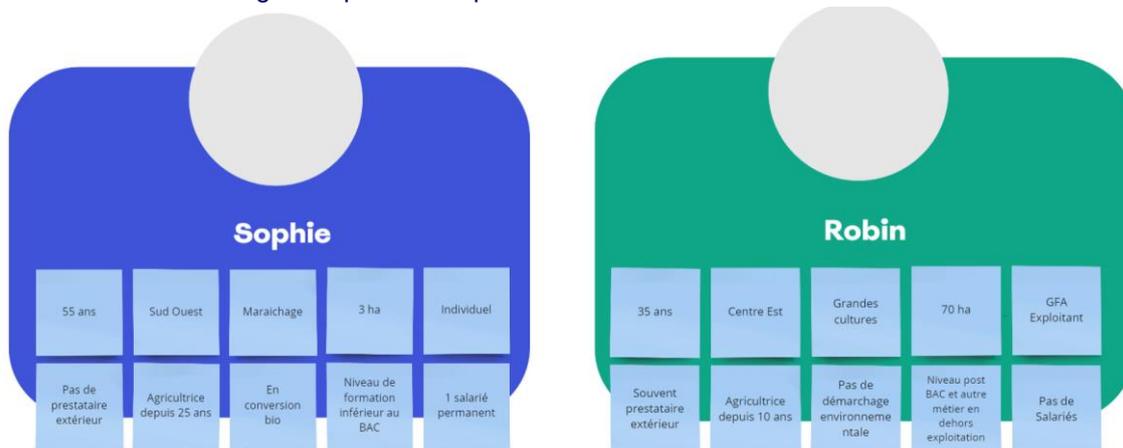
	Isolement de l'exploitation	Pas de service après-vente (SAV) ou de service de réparation robot si territoire isolé, Besoin d'un réseau de concessionnaires bien maillé.
	Relations avec les filières et débouchés sur place	Besoin d'homogénéité des filières sur place pour faciliter le travail des concessionnaires
	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. Force au traitement embarqué 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, agro-écologiques...	Possibilité de rattraper un désherbage mécanique qui aurait été raté. Plein de formes de désherbage sélectif différents, Potentiellement robots multi-usages pour opération autre 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	Débit 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 maraichage sol vivant avec mulch épais ou autre
Réglementation et encadrement technique	Justification de pratiques culturales	Opérateur nécessaire pour surveiller les robots (encore combien ?)
	Contraintes de cahier des charges	Peut favoriser l'abandon de certains produits phytosanitaires et pousser à l'agriculture biologique

Tableau 14 : Analyse détaillée de l'implantation d'outils robotiques de désherbage sélectif dans les fermes

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

Deux personas 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. 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.

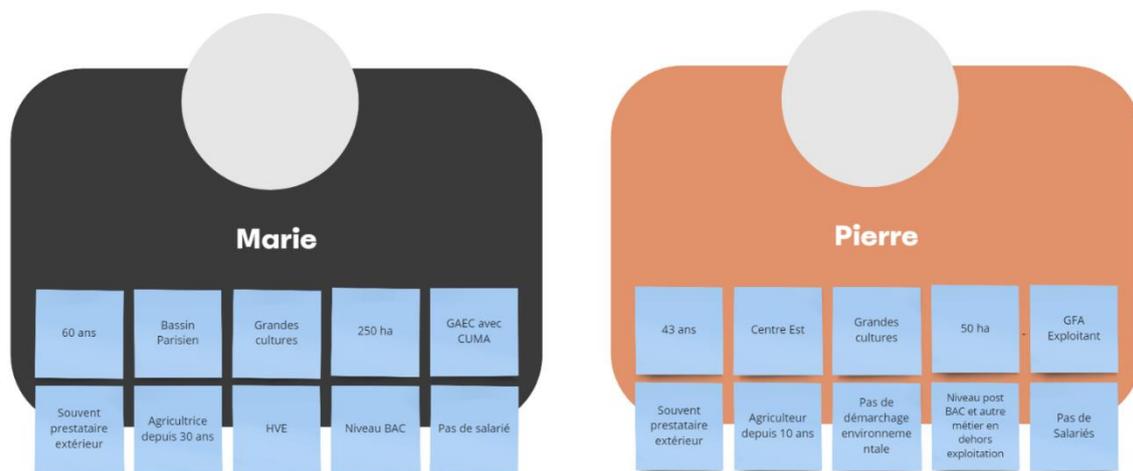
Macro-critères	Sous critères	Détails
Structure et taille de l'exploitation	Fractionnement et Éloignement du parcellaire	Pas vraiment applicable ici.
	Taille de l'exploitation	Période de traitement optimisé de plus en plus courte et aléatoire donc plus compliqué pour exploitations de grande taille. L'itinéraire 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.
	Etat 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 : 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, agro-écologiques...	Les modes de production actuels ne sont pas les plus économes en intrants, Réflexions à la ferme sur les mélanges les plus adaptés localement, Eléments d'agriculture durable rajoutés dans les critères de rentrée au catalogue, Besoin de variétés spécifiques pour le semis direct. L'agriculteur est maître de son choix (dans un certain cadre ou regard du catalogue ou autre) mais n'a la main que marginalement sur l'évolution des activités de sélection si pas réalisées localement.
	Organisation du travail sur l'exploitation	Pas vraiment applicable ici.
	Temps de travail	Travail de multiplication peut représenter une hausse de main d'oeuvre (par exemple : castration du maïs).
	Adaptation aux itinéraires en place	Variétés peuvent modifier ou impacter la structure des plantes et donc faire évoluer les structures techniques sur l'itinéraires.
Réglementation et encadrement technique	Justification de pratiques culturales	
	Contraintes de cahier des charges	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 personas agricoles autour de la sélection conventionnelle

Deux personas sont ici imaginés :

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



Pierre entretient une relation assez étroite avec son sélectionneur. L'entreprise de sélection travaille sur des variétés locales et 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 son sélectionneur), 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 ces 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.

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 pédo-climatiques. 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. 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.

Matrices SWOT et Matrices des leviers associés aux innovations technologiques

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

A. Sélection conventionnelle

Si vous avez des expertises complémentaires à partager sur la sélection conventionnelle dans l'ensemble de ces sections, merci de nous contacter à cleroux@aspexit.com

<p style="text-align: center;">FORCES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Brassages et mélanges massifs • Possibilité d'avoir des plants très hétérogène • Capacité à faire de la sélection adaptée au sol & climat local • Adaptation progressive au Changement climatique par les plants sélectionnés (delta faible) • Croisement contrôlés réalisables à la ferme • Peu de structures de coût supplémentaires (sauf si phénotypage haut débit) • Capacité à réaliser des mélanges de variétés (plantes et couverts...) • Efficience de la sélection conventionnelle pour améliorer les profils de variétés 	<p style="text-align: center;">OPPORTUNITÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Acceptabilité sociale sans problème • Dépendance actuelle aux semences privées • 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"> • Difficile de sélectionner des critères pluri-dimensionnels en se projetant dans des scénarios climatiques futurs • Absence de recherche sur tout un tas d'espèces végétales (on est que sur des niches) • Difficulté de Prédire le comportement d'une plante dans une condition que l'on a pas testé • La Sélection conventionnelle peut être chronophage • Les travaux de sélections passé conduisent à toujours utiliser des phytosanitaires 	<p style="text-align: center;">MENACES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dérèglement climatique trop rapide par rapport au capacité de déploiement de la sélection • Intérêt privilégié pour les NBT • Conditions de phénotypage de plus en plus complexes avec le dérèglement climatique (avec combinatoire important..) • Pas de débouchés et d'utilisation de variétés sélectionnés en IAA derrière • Dépendance complète de certains pays qui seront les seuls à faire des céréales productives • Quid de la sélection conventionnelle si les régimes alimentaires n'évoluent pas aussi • Le potentiel d'une variété n'est révélée que si les pratiques culturales le permettent

<p>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 • 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 • Fixer des objectifs de durabilité et de meilleure efficacité de l'azote pour les variétés 	<p>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 semences • 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

Si vous avez des expertises complémentaires à partager sur l'agro-équipement dans l'ensemble de ces sections, merci de nous contacter à cleroux@aspexit.com

FORCES	OPPORTUNITÉS
<ul style="list-style-type: none"> • Agro-équipement léger (moins de tassements de sol) • Diminution de la pénibilité du travail de désherbage (notamment si allongé...) • Adaptabilité du matériel aux conditions de travail de l'agriculteur • Possibilité de faire du rétrofit • Maintien du travail humain et emploi agricole • Réparabilité du matériel • Capacité d'autoconstruction du matériel (plans en open source, partage d'expérience) • Communauté élargie pour échange de bonnes pratiques, amélioration et réparation du matériel • Multi-usage (désherbage, plantation, récoltes) • L'auto-construction revient moins cher économiquement 	<ul style="list-style-type: none"> • Permet de sortir de la dépendance forte aux constructeurs de machines dans le monde (voir les parts de marchés du matériel agricole) • Permet de sortir de la dépendance à la matière et composants électroniques pour l'agro-équipement classique • Attractivité du métier grâce à la réduction de la pénibilité (TMS, ombrage et autres) • Développement de structures à taille modeste et maraîchage agro-écologiquement intensif • Développement de nouveaux itinéraires culturaux qui étaient trop pénibles • Développement du maraîchage diversifié sur petite surface
FAIBLESSES	MENACES
<ul style="list-style-type: none"> • Temps dédié à la construction et entretien du matériel • Baisse du rendement par hectares et par humain • Dépendances au flux physiques et aux matières si assistance électrique • Envie/volonté pas toujours partagée d'auto-construire son matériel (geek) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de capacité à déployer massivement et en un temps limité ce genre d'outils • Concentration de l'intérêt vers l'agro-équipement lourd et la robotique • Contexte économique qui rend la Main d'œuvre insuffisante & dépendance à de la main d'œuvre (étrangère, stagiaire, woofers..) • Préjugé d'archaïsme de ces technologies, Manque d'acceptabilité, Outils jugé trop inconfortables • Risque d'empilement technologique avec l'agro-équipement déjà présent • Pas de consentement à payer du consommateur (coût de l'alimentation qui augmenterait) • Politiques fiscales et comptables actuelles qui poussent au renouvellement machinique

<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) • Modèle hybride 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

Si vous avez des expertises complémentaires à partager sur la robotique dans l'ensemble de ces sections, merci de nous contacter à cleroux@aspexit.com

FORCES	OPPORTUNITÉS
<ul style="list-style-type: none"> • Robot léger (moins de tassements de sol) • Diminution de la pénibilité du travail de désherbage • Capacité à faire du bio sans travail du sol • Libère du temps pour d'autres tâches • Capacité à travailler à n'importe quelle heure de la journée • Filière robotique française bien développée • Limitation des résistances si passage régulier de désherbage (mécanique ou autre) • Capacité des opérateurs à observer les parcelles en parallèle des activités robotiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficulté à trouver de la main d'oeuvre locale et qualifiée • Raréfaction des énergies fossiles et approvisionnement énergétique • Attractivité du métier pour une partie des jeunes • Grand Défi Robotique (PEPR AgroEcologie & Numérique) • Capacité potentielle à amener des trajectoires agro-écologiques avec robots agiles et de petite taille • Possibilité de mettre en place des itinéraires culturels avancés agronomiquement si désherbage sélectif
FAIBLESSES	MENACES
<ul style="list-style-type: none"> • Pas de capacité à discriminer toutes les espèces sur les parcelles • Coût élevé d'investissement dans les outils robotiques • Robots encore très monotâches (à relativiser sur les robots porte-outils) • Encore très peu d'ACV sur la robotique (déplacement des robots entre parcelles, durée de vie des équipements, obsolescence...) • Besoin de compétences pour faire fonctionner et réparer les robots • Autonomie énergétique des robots (Rechargement des batteries, raccordement au réseau..) • Semi-autonomie des robots (notamment pour cause réglementaire) • Débits de chantier variables entre les robots (potentiellement faible) • Peu de capacité encore à passer sur des systèmes de grandes cultures • Besoin de conditions au champ relativement faciles pour fonctionner 	<ul style="list-style-type: none"> • Besoin d'adaptation des itinéraires culturels aux fonctionnements des robots & Standardisation des itinéraires agricoles • Incapacité des agriculteurs à réparer leurs outils de travail (licences d'utilisation et d'exploitation, compétences nouvelles...) • Remplacement des ouvriers agricoles • Sur-adaptabilité des robots en conditions occidentalisées • Endettement des fermes pour accéder à des systèmes robotisés + coûts cachés (maintenance, mises à jour...) • Cyber-attaques sur les unités robotiques (matériel, micro-logiciels, systèmes de communication) • Sur-empilement technologique avec un robot en + de l'agro-équipement disponible • Acceptabilité du milieu agricole et des consommateurs d'itinéraires robotisés pour produire des aliments • Inégalités d'accès aux outils robotiques sur les territoires (zones blanches, exploitations isolées..) • Défaut d'approvisionnement en puces électroniques • Perte de connaissance / savoir empirique sur les adventices locales • Capture des données collectées par les prestataires et potentiellement revente aux spéculateurs, et autres... • Black out magnétique qui affecterait les capacités de positionnement GNSS

<p style="text-align: center;">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 style="text-align: center;">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 style="text-align: center;">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 agro-écologiques 	<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"> • 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 DEEE • Encourager les design évolutifs, modulaire, réparable

D. Optimisation de l'alimentation animale

Si vous avez des expertises complémentaires à partager sur l'optimisation de l'alimentation animale dans l'ensemble de ces sections, merci de nous contacter à cleroux@aspexit.com

FORCES	OPPORTUNITÉS
<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance assez claire du bilan GES des élevages (mais pas trop pour les co-produits et systèmes polyculture-élevage) • Identification individuelle des animaux relativement simple (passeport et boucle individuelle des animaux même si tout n'est pas forcément connecté) • Données massives et temporelles des états et consommations animales (mais mal pour les consommations en pâturage) • Technologies relativement matures et déployables • On s'insère dans un modèle agricole existant pour ceux qui utilisent déjà des minéraux et additifs (plus compliqué pour animaux à l'herbe) • Prix pas forcément exorbitant des technologies d'alimentation (additifs et autres) • Pas mal de références techniques : publications en ferme expérimentales, et proches des conditions terrain 	<ul style="list-style-type: none"> • Methane Pledge Européen • Importance des émissions de méthane dans le bilan GES agricole • IAA doivent être moteurs dans la réduction de leur scope 3 • Capacité de valorisation financière et extra-financière pour des filières d'élevage en difficulté (pérennité et image) • Aller vers une meilleure connaissance des aliments en continu
FAIBLESSES	MENACES
<ul style="list-style-type: none"> • Compatibilité principalement des animaux en bâtiment avec maîtrise de la ration • Pas toujours de modèle économique associé à ces technologies (qui paye...) • Pas assez de facteurs de réassurance (références GES et technico-économiques) • Capacité des méthodes Cap2er à intégrer précisément toutes ces questions d'alimentation • Contradictions possibles entre bilan GES et bien être animal ou ACV plus large • Incompatibilité avec certains cahiers des charges très exigeants • Risque potentiel de blessures physiques aux technologies utilisées • Risque d'effets antagonistes entre les technologies 	<ul style="list-style-type: none"> • Effet rebond dû à l'efficacité alimentaire (augmentation nombre d'animaux parce que moins d'émissions par animaux) • Concentration et du développement des outils adaptés aux systèmes d'élevage intensifs (risques d'homogénéisation) • Maintient un besoin de protéines concentrés et donc question de l'origine de l'alimentation et de son bilan global • Tamagoshisation de la production animale & Risque de réduire le bien-être animal aux observations facilement disponibles • Report d'un enjeu agronomique vers un enjeu technologique (tout faire pour ne pas baisser le cheptel) • Acceptabilité sociale des outils mis en place • Consommation de viande française qui ne diminue pas • Dépendance de la France aux importations de viande (au bilan GES moins propre qu'en France) • Peu d'efforts réalisés parce que bilan GES bovin français bien meilleur qu'ailleurs • Risque de ne pas favoriser le maintien des prairies permanentes

<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 • Recherche de 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"> • Accompagnement technique et financier 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

Si vous avez des expertises complémentaires à partager sur la production en environnement contrôlé dans l'ensemble de ces sections, merci de nous contacter à cleroux@aspexit.com

<p style="text-align: center;">FORCES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Production intensive sur peu de surface • Forte économie de certains intrants (phytosanitaires et eau notamment), Circularité et bouclage des intrants • Moins de maladies sur les plants, même si replantés après • Capacité à rapprocher les urbains de la production • Plein de modèles différents (aquaponie, hydroponie..) • Peu de saisonnalité donc main d'oeuvre embauchable sur contrats longs 	<p style="text-align: center;">OPPORTUNITÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limitation de la déforestation importée dans le cadre de certaines production parce que production sur place • Capacité à réduire les émissions évitées (ex : Mangroves pour crevetticulture) • Réduction des dépendances parce que production locale (ex : lois votées par Inde et Maroc où limitations à l'exportation) • Possibilité d'aller chercher des génétiques anciennes ou variétés spécifiques (qui seraient trop sensibles en production à l'extérieur) • Contraintes fortes sur les consommations d'intrants (ex : Barcelone sur l'eau) • Risques de manques d'eau plus importants que risques de chaleur
<p style="text-align: center;">FAIBLESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Production contrainte sur certaines cultures (céréales etc) • Difficulté de passer ces systèmes de production à l'échelle • Pas nécessairement 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"> • Concurrence possible avec de l'alimentation plein champ • Potentielle automatisation complète de ces types de production et impact associé sur l'emploi • Risque de macro-fermes contrôlées par peu d'acteurs (risque identique pour l'agriculture actuelles) • Origine de l'alimentation des animaux d'élevage (aquaculture et autres) • Non acceptabilité sociale (agriculteurs et consommateurs) des productions en environnement contrôlé

<p>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>STRATÉGIES DE PRÉVENTION DES MENACES GRÂCE À NOS POINTS FORTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Soutien financiers 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>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>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

Si vous avez des expertises complémentaires à partager sur la **biostimulation** et les **solutions numériques collaboratives**, merci de nous contacter à cleroux@aspexit.com