

## Mémoire

présenté par

**Hermouet Edwige**

Master Agrosiences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt  
Parcours « De l'Agronomie à l'Agroécologie »

# Évaluation multicritère de systèmes de grande culture en travail du sol réduit et sans glyphosate

Pour l'obtention du diplôme de  
Master Agrosiences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt



© Edwige Hermouet

Enseignant responsable du stage : Prost Lorène

Maître de stage : Giuliano Simon

Soutenu le 30 août 2023

## Engagement de non-plagiat

### ① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

### ② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sur d'en citer la source.

**③ Sanction** : En cas de manquement à ces consignes, le département SIAFEE se réserve le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

### ④ Engagement :

Je soussigné (e) Edwige HERMOUET  
Reconnait avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Seysses le 28/07/2023  
Signature :



## Remerciements

Je repars de ce stage ravie et grandie. Et cela n'aurait pas été possible sans toutes les personnes que je m'apprête à remercier.

Merci tout d'abord à **Simon Giuliano**. Merci pour ta gentillesse et tes conseils toujours justes et avisés dans la rédaction de ce rapport et de mon travail en général. Merci pour ta présence et ton implication tout au long de mon stage et ce même lorsque ton emploi du temps se chargeait. Merci enfin pour la confiance et l'autonomie que tu m'as accordée.

Merci également à **Lorène Prost** pour son accompagnement et ses conseils pendant ce stage.

Je remercie ensuite l'ensemble de l'équipe du Campus de Lamothe pour leur accueil et leur sympathie tout au long de ces 6 mois. Ça a été un réel plaisir de venir travailler à Lamothe au quotidien et c'est non sans émotions que je repars d'ici. Merci donc à **Mickaël Cazeneuve, Jean-Philippe Dalpozzo, Valentin Deremetz, Mylène Gorce, Hélène Martin, Laura Meymerit, Jean-Jacques Plauzolles, Claire Sarfati et Gervais Wallois**.

Merci plus particulièrement à Valentin pour ton aide toujours précieuse et toutes tes réponses à mes questions. Merci d'avoir partagé ton quotidien d'ingénieur de recherche sur la plateforme.

Merci aussi à Hélène d'avoir toujours été à l'écoute, toujours à répondre à mes questionnements que ce soit sur le stage ou sur ma future vie professionnelle, toujours à m'aider quand j'en avais besoin. Je te remercie pour toutes ces sessions de prélèvements sur le terrain et de tri au labo que l'on a pu partager. Ça a été un vrai plaisir de travailler avec toi.

Merci à Mickaël pour ta bonne humeur quotidienne et tes blagues, également quotidiennes, sur le fameux glypho. J'en sourirais encore longtemps.

Merci à Jean-Jacques pour ton accent du Sud qui ensoleillait mes journées déjà bien ensoleillées. Merci pour l'ambiance rugbystique parfois sarcastique mais toujours bienveillante que tu as insufflée, c'est là qu'on reconnaît les vrais supporters.

Je remercie ensuite toute l'équipe de stagiaires et alternants que j'ai pu côtoyer à Lamothe.

Merci à Paul pour l'ambiance musicale et toutes tes blagues tout au long des sessions de prélèvements et de tri.

Merci à Perrine pour ta gentillesse. Merci pour tes petites attentions gourmandes qui ont toujours permis de maintenir notre glycémie à un niveau optimal.

Merci à Alice pour ton soutien tout au long de ce stage, ça a été un plaisir de partager ces trajets quotidiens avec toi à bord de mon bolide tout comme partager ce bureau avec toi. J'ai adoré découvrir les Poulards et les petits épeautres (surtout Antennato).

Enfin, à l'heure d'envoyer le rapport qui clôturera mes années de scolarité, je remercie toutes les personnes que j'ai pu rencontrer au fil de toutes ces années. Je remercie l'ensemble des enseignants que j'ai pu côtoyer depuis la primaire jusqu'au Master 2, l'ensemble de mes camarades, de mes collègues stagiaires, de mes ami.es, ... Je ne vais pas citer tout le monde, mais je n'oublie pas la place que chacun.e d'entre vous a eu dans mon parcours. Un merci spécial aussi pour mes parents, mes sœurs et mes frères de me soutenir avec fierté dans tout ce que j'entreprends.

## Sommaire

<b>Engagement de non-plagiat</b> .....	2
<b>Remerciements</b> .....	3
<b>Sommaire</b> .....	4
<b>Introduction</b> .....	5
Glyphosate : usages et alternatives.....	5
Des situations qui restent qualifiées d'impasses techniques.....	7
Contexte de l'étude : des systèmes maïsicoles en transition.....	7
Démarche de conception-évaluation de systèmes de culture .....	8
Projet ALIAGE et Objectifs du stage.....	10
<b>Matériels et Méthodes</b> .....	11
Site expérimental.....	11
Description des systèmes existants.....	12
Description des systèmes issus des ateliers de co-conception .....	13
Démarche de co-conception.....	13
Description des systèmes co-conçus.....	14
Évaluation multicritère.....	14
Analyses des données.....	15
<b>Résultats</b> .....	16
Évaluation ex post des systèmes en semis direct.....	16
Analyse en composantes principales .....	16
Performance des systèmes .....	16
Évaluation ex ante des prototypes co-conçus.....	20
Performances des prototypes.....	20
Comparaison par rapport aux objectifs initiaux .....	23
<b>Discussion</b> .....	24
Forces et faiblesses des systèmes en semis direct évalués <i>ex post</i> .....	24
Choix du prototype à expérimenter et limites de l'approche <i>ex ante</i> .....	27
Niveau de rupture des prototypes .....	28
<b>Conclusion</b> .....	30
<b>Bibliographie</b> .....	31
<b>Annexes</b> .....	36
<b>Abstract</b> .....	39
<b>Résumé</b> .....	39

## Introduction

L'industrialisation des systèmes agricoles est responsable de nombreux effets délétères : diminution de la biodiversité, pollution des eaux, dégradation des sols, émissions de gaz à effet de serre (Stoate *et al.*, 2001). L'agriculture conventionnelle n'est aujourd'hui pas en mesure de répondre au défi à la fois de production alimentaire et de préservation des écosystèmes (Lichtfouse *et al.*, 2008). Dans un contexte global de prise de conscience des risques environnementaux et également pour la santé humaine, l'usage des pesticides pose question, en témoignent les nombreux débats sur l'éventuelle interdiction du glyphosate en agriculture. Le glyphosate (N-phosphonométhyl glycine) est un herbicide qui a la particularité d'être total, il touche toutes les plantes, et systémique, il migre dans les tissus végétaux et atteint ainsi à la fois les parties aériennes et les parties souterraines (Reboud *et al.*, 2017). Il agit sur la synthèse de certains acides aminés essentiels pour la plante notamment en bloquant la chaîne des précurseurs (ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA), 2019). Son brevet a été déposé par Monsanto en 1969 et est passé dans le domaine public en 2000. Commercialisé depuis 1974, son utilisation s'est massivement développée notamment aux États-Unis via le développement des maïs génétiquement modifiés résistants au glyphosate dits « RoundUp Ready » (Benbrook, 2016). En 1996, seules 4 % des surfaces de maïs étaient traitées au glyphosate contre 77 % en 2014 (Benbrook, 2016). En 2014 aux États-Unis, près de 89 % des surfaces de maïs étaient des maïs génétiquement modifiés possédant une résistance aux herbicides (USDA, 2020). En 2017, le glyphosate est l'herbicide le plus utilisé au monde, en particulier sur les espèces transgéniques (Duke, 2018). Il représente, la même année, 31 % du volume total d'herbicides vendus en France (Antier *et al.*, 2020). En 2018, 57 % des systèmes suivis par le réseau DEPHY utilisaient au moins une fois du glyphosate à l'échelle de leurs rotations (CAN DEPHY, 2018). À l'heure actuelle, 23 produits contenant du glyphosate sont encore commercialisés en France (ANSES, 2023).

### Glyphosate : usages et alternatives

Les qualificatifs ne manquent pas pour décrire cette molécule : « *a once-in-a-century herbicide* » (Dukes & Powles, 2008), une molécule « pivot », une substance active « majeure » (Mahé *et al.*, 2020), illustrant ainsi la place prépondérante du glyphosate dans le paysage agricole actuel. Initialement, son utilisation était destinée à la lutte contre les vivaces puis elle s'est largement étendue notamment à la gestion du salissement en interculture (Rodriguez *et al.*, 2019). En grande culture aujourd'hui, le glyphosate est utilisé pour trois catégories d'usage : maîtriser la flore adventice difficile comme les vivaces, détruire les couverts et prairies temporaires et gérer le salissement des parcelles avant le semis (CAN DEPHY, 2018). En 2017, une enquête réalisée par le SSP (Service de la Statistique et de la Prospective du ministère de l'Agriculture) a permis de montrer que 91 % des utilisations sont réalisées en interculture jusqu'au jour du semis (Bonin *et al.*, 2021).

Néanmoins, les conséquences de l'utilisation du glyphosate sur la santé humaine posent question. En mars 2015, le CIRC (Centre International de Recherches sur le Cancer) a classé le glyphosate comme « probablement cancérigène pour l'Homme ». Huit mois plus tard, l'EFSA (Autorité Européenne de Sécurité des Aliments) a conclu qu'il était peu probable que le glyphosate présente un risque cancérigène pour l'Homme (EFSA, 2015). Les études scientifiques sur le sujet sont controversées et le terme glyphosate est souvent utilisé sans faire référence aux nombreux adjuvants qui sont contenus dans les différentes formules commercialisées du glyphosate (Mesnage & Antoniou, 2018). La prise en compte ou non des adjuvants modifie les conclusions sur la toxicité comme le montre l'étude de Mesnage *et al.* (2014) qui a comparé la molécule de glyphosate à différentes formulations de RoundUp. Enfin, la toxicité du glyphosate en lui-même pose question mais également celle de ses produits de dégradation et notamment de l'AMPA (Acide aminométhylphosphonique). En effet, même si le glyphosate se dégrade principalement dans la couche arable, par ruissellement, l'AMPA se retrouve dans les eaux de surface et les cours d'eaux (Piel *et al.*, 2019). En 2017, le glyphosate est retrouvé dans 50 % des prélèvements et l'AMPA dans 74 % des prélèvements d'eaux de surface (rivières et lacs en France) même si les concentrations restent globalement inférieures aux seuils de toxicité (ANSES, 2019). Toutefois, ces molécules ne sont pas sans impact sur la faune et la flore. L'accumulation

de glyphosate diminue la croissance des lentilles d'eau communes (*Lemna minor*) en perturbant la synthèse des pigments chlorophylliens (Sikorski *et al.*, 2019). Le glyphosate cause principalement du stress oxydatif chez plusieurs espèces de poissons et l'AMPA peut être génotoxique en plus d'avoir des conséquences néfastes sur la survie des têtards du crapaud épineux (*Bufo spinosus*) (Tresnakova *et al.*, 2021). De plus, dans l'étude de Pelosi *et al.* (2022) le glyphosate et l'AMPA sont retrouvés dans respectivement 74 et 38 % des échantillons de vers de terre, illustrant le transfert des molécules jusque dans les réseaux alimentaires terrestres alors même que l'exposition au glyphosate peut causer des dommages au niveau de l'ADN des vers de terre et ce à des concentrations similaires à celles retrouvées dans l'environnement (Piola *et al.*, 2012).

La question du retrait du glyphosate n'est pas un sujet isolé. Depuis les années 2000, le nombre de retraits de matières actives est supérieur à celui des autorisations (Mahé *et al.*, 2020). Néanmoins, tout comme l'atrazine au début des années 2000 ou les néonicotinoïdes plus récemment, le glyphosate et sa procédure de retrait sont particulièrement sujets à controverse. Du fait des risques pour la santé humaine mais aussi pour l'environnement, le 1<sup>er</sup> janvier 2017, l'utilisation de glyphosate a déjà été interdite par les collectivités dans les lieux ouverts au public. La molécule a ensuite été interdite pour les particuliers le 1<sup>er</sup> janvier 2019 (OFB, 2021). Puis, en décembre 2019, l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire) a annoncé le retrait de 36 produits commercialisés en France contenant du glyphosate. Le 15 décembre 2022 correspondait initialement à la date butoir de l'éventuel renouvellement de l'utilisation du glyphosate en Europe. Néanmoins, faute de décision à la majorité, une année supplémentaire a été accordée au glyphosate par la Commission européenne dans l'attente de l'avis de l'EFSA (Autorité Européenne de Sécurité des Aliments) prévu en juillet 2023 (FoodWatch France, 2023). Dans le contexte des grandes cultures, il est aujourd'hui utilisable principalement en non-labour à la dose maximale annuelle de 1080 g/ha (Perriot & Gautelier Vizios, 2022). Même si les ventes de glyphosate sont passées de 8 645 à 7 765 t entre 2020 et 2021 (Ministère de la Transition Écologique, 2022), soit une diminution de 14 %, son utilisation reste élevée. D'après une enquête inter-instituts réalisée en 2019 et regroupant plus de 7 600 réponses, 78 % des agriculteurs ne sauraient pas comment gérer les adventices sans cet herbicide (Bonin *et al.*, 2021).

Néanmoins, des alternatives au glyphosate existent. Des stratégies de substitution se développent. Elles se définissent par le remplacement de techniques et de pratiques (Pretty *et al.*, 2018). Dans le contexte du glyphosate, des stratégies avec d'autres molécules sont développées, notamment sur les dicotylédones. En revanche, sur les graminées, il n'existe à ce jour pas de substances actives de synthèse aptes à remplacer le glyphosate en interculture. Les molécules bioherbicides se développent mais se révèlent peu efficaces, comme avec l'acide pélargonique qui de part son action de contact a une efficacité limitée. Les substitutions chimiques au glyphosate sont donc relativement limitées et ce particulièrement pour les graminées (Perriot & Gautelier Vizios, 2022). La principale substitution au glyphosate reste le travail du sol que ce soit via le labour et/ou la pratique de faux-semis. Les systèmes en TCS (Techniques Culturelles Simplifiées), donc sans labour, consomment en effet 2.5 fois plus de glyphosate que les systèmes qui contiennent au moins un labour dans la rotation (CAN DEPHY, 2018). Dans le rapport de l'INRAE de Reboud *et al.* 2017, sont également évoquées d'autres stratégies comme la destruction des couverts intermédiaires via le recours au gel hivernal avec un choix d'espèces adaptées ou via une destruction mécanique, ou encore la culture sous mulchs. Toutefois, ces stratégies n'ont à elles-seules qu'un effet partiel et elles risquent d'impliquer des surcoûts pour les agriculteurs. 70 % des agriculteurs estiment que des investissements leur seront nécessaires afin de s'équiper en matériel de travail du sol adéquat en cas de retrait de la molécule (Bonin *et al.*, 2021). De plus, si les agriculteurs décident de revenir à des labours fréquents pour parvenir à se passer de glyphosate, cela entraînera des surcoûts (équipement, carburant, main d'œuvre) de l'ordre de 4.38 à 79.83 €/ha selon les scénarios (Carpentier *et al.*, 2020). En effet, le labour est une pratique coûteuse en temps, en énergie, en matériel et il a également des conséquences néfastes sur les sols. Il accentue les phénomènes d'érosion hydrique et éolienne et dégrade le fonctionnement biologique des sols en diminuant le taux de matière organique notamment dans les premiers horizons du sol, en réduisant les populations de vers de terre et en modifiant la distribution spatiale et la composition des communautés microbiennes (Eriksen-Hamel *et al.*, 2009 ; Haddaway *et al.*, 2017 ; Lucas *et al.*, 2018 ; Sun *et al.*, 2018).

## Des situations qui restent qualifiées d'impasses techniques

Même si les alternatives évoquées précédemment peuvent permettre de se passer de glyphosate, certaines situations restent qualifiées d'impasses techniques. Le terme d'impasse est utilisé lorsque la seule alternative envisageable consiste en un désherbage manuel de la flore vivace (Reboud *et al.*, 2017). Des systèmes menés dans des conditions difficiles comme les vignes en pente ou des situations de niches comme la récolte des fruits à coques ou le rouissage du lin fibre font partie de ces situations qualifiées d'impasses techniques. Les systèmes en agriculture de conservation des sols, représentant environ 4 % des surfaces de grande culture françaises, rentrent également dans cette catégorie (Reboud *et al.*, 2017). C'est sur ce type de système que portera cette étude.

L'agriculture de conservation des sols (ACS) repose sur 3 piliers : couverture permanente du sol, perturbation mécanique minimale et diversification (FAO, 2022). Le développement de l'ACS vient en réponse au phénomène de « *Dust Bowl* » observé aux États-Unis dans les années 30. Ce phénomène de « *Dust Bowl* » est survenu suite à l'alternance de périodes de sécheresse et de pluie, le tout avec des vents violents provoquant alors des phénomènes d'érosion dévastateurs incitant à sortir du labour (Mollier, 2013). Le développement des herbicides d'une part et des semoirs adaptés d'autre part ont donc permis la progression de l'ACS et de l'ensemble des techniques culturales sans labour qui y sont associées (Lucas *et al.*, 2018). Les techniques sans labour sont généralement regroupées en deux catégories : les Techniques Culturales Simplifiées et le Semis Direct. Dans le premier cas, les horizons pédologiques ne sont certes pas retournés mais un travail du sol superficiel est réalisé. Les pratiques sont diverses et le travail est variable en termes de fréquence, de profondeur et d'intensité. Dans le cas du semis direct, il n'y a pas de travail du sol hormis celui du semoir (Goulet & Vinck, 2012). En France, le développement de l'agriculture de conservation débute dans les années 90, dans un contexte où les agriculteurs cherchent à baisser leurs charges et où les préconisations sur la couverture des sols se développent (Lucas *et al.*, 2018). De nombreux agriculteurs se rejoignent alors dans le cadre de CETA (Centre d'Études Techniques Agricoles) ou de GDA (Groupes de Développement Agricole). Par la suite, en 1999, l'APAD (Association pour une Agriculture Durable) et la revue TCS (Techniques Culturales Simplifiées) sont créées et permettent là encore de faire du lien entre les agriculteurs investis en ACS et de diffuser les connaissances à plus grande échelle. Des acteurs privés soutiennent ces initiatives et notamment Monsanto qui a cherché à développer l'agriculture de conservation en France en jouant un rôle important notamment au sein de l'APAD (Lucas *et al.*, 2018). L'agriculture de conservation est en effet globalement dépendante des herbicides et notamment du glyphosate. Même si aujourd'hui, les liens directs avec Monsanto ont été rompus, que la revue TCS a stoppé toute diffusion de publicité sur le glyphosate depuis 2004, les partisans de l'agriculture de conservation restent encore globalement contre l'interdiction de la molécule du fait du manque d'alternatives (Lucas *et al.*, 2018). En effet, comme l'écrivent Reboud *et al.* (2017), « il n'y a pas d'alternative efficace au glyphosate pour entretenir une parcelle dans la durée sans travailler le sol ». Dans ce contexte actuel d'éventuelle suppression du glyphosate et où de nombreux agriculteurs cherchent à réduire le travail du sol, il apparaît nécessaire de réfléchir plus en profondeur à la reconception des systèmes.

## Contexte de l'étude : des systèmes maïsicoles en transition

Cette étude se déroule dans la région Occitanie, en Haute-Garonne, sur la plateforme expérimentale de l'École d'Ingénieurs de Purpan. La culture du maïs est très développée dans le territoire puisque les régions Nouvelle-Aquitaine et Occitanie représentent à elles-seules près de 40 % de la production de maïs (grain et semences) (Chégut *et al.*, 2018). Le système conventionnel de monoculture de maïs s'est massivement développé et représentait 20 % des surfaces françaises en maïs grain entre 2006 et 2009 (Espagnol, 2015). Ces systèmes sont généralement basés sur des labours fréquents. En effet, le labour permet d'optimiser le réchauffement du sol au printemps pour favoriser la levée mais est aussi un levier de gestion de *Fusarium sp.* et des adventices annuelles (Meissle *et al.*, 2010).

Ces systèmes conventionnels irrigués présentent néanmoins des impacts environnementaux. L'utilisation massive d'eau souterraine peut d'une part épuiser les aquifères et d'autre part augmenter l'énergie nécessaire pour récupérer l'eau (Chen *et al.*, 2019). L'utilisation d'eau en surface va quant à

elle impacter les débits sur l'ensemble de la plaine alluviale (Yasarer *et al.*, 2020). La qualité de l'eau est également dégradée de part la présence de pesticides, de nitrates et de terre en suspension (Giuliano, 2023). En effet, des molécules herbicides sont retrouvées dans les eaux de drainage comme la mésotrione mais aussi le glyphosate et l'AMPA (Giuliano *et al.*, 2021). Les monocultures de maïs sont d'autant plus sujettes à cette problématique du fait du labour, de la période de sol nu qui s'ensuit, de l'utilisation d'irrigation et de l'utilisation d'herbicides tôt dans la saison (Ghidey *et al.*, 2005 ; Giuliano *et al.*, 2023). Le labour répété dans ce type de système a aussi des conséquences sur la biodiversité en diminuant par exemple l'abondance des vers de terre (Carter *et al.*, 2002). Enfin, ces systèmes sont très énergivores du fait de l'irrigation, de la fabrication des engrais, du labour ou encore du séchage des grains (Giuliano *et al.*, 2023). Tous ces aspects amènent à repenser la pertinence de ces systèmes face au contexte actuel de dérèglement climatique notamment.

Dans ce cadre, des systèmes alternatifs à la monoculture conventionnelle se développent. Les techniques culturales sans labour prennent de l'ampleur sur le maïs. Entre 1994 et 2001, les parcelles de maïs grain implantées sans labour sont passées de 2 à 14 % (Labreuche *et al.*, 2007). En 2006, ce sont 20 % des surfaces de maïs grain qui ont été implantées sans labour (Labreuche & Eschenbrenner, 2011). En 2017, 45 % des surfaces étaient couvertes pendant l'hiver témoignant du développement des cultures intermédiaires (Agreste, 2020). En effet, planter le maïs en TCS ou en semis direct représente beaucoup d'atouts (Thomas, 2006). L'absence de labour va permettre de limiter les phénomènes d'érosion, d'améliorer la structure des sols et le cycle des nutriments tout en réduisant les charges de mécanisation (Reicosky & Saxton, 2007). Le semis sous couvert permet également de limiter fortement l'évapotranspiration et d'augmenter la réserve utile du sol via l'amélioration du taux de matière organique. Le maïs bénéficie aussi d'une meilleure alimentation en fin de cycle du fait de la minéralisation plus lente qui s'opère (Thomas, 2006). De plus, l'implantation de maïs derrière un couvert roulé peut aussi être un levier de gestion des adventices (Peigné *et al.*, 2022). Étant donné que la gestion des adventices en maïs repose principalement sur l'utilisation d'herbicides avec un IFT (Indice de Fréquence de Traitement) moyen à 2.8 et 98 % des surfaces traitées, les TCS et le semis direct peuvent présenter des atouts autres que l'amélioration de la qualité des sols (Agreste, 2020).

## Démarche de conception-évaluation de systèmes de culture

Dans son rapport de 2017, l'INRAE indique : « l'adaptation à un arrêt du glyphosate passe et passera par des changements profonds ». Les stratégies évoquées en alternative au glyphosate doivent être combinées et s'intégrer dans une stratégie globale de reconception. En effet, la reconception a pour objectif d'assurer la durabilité des systèmes en mettant l'accent sur la composition et la structure des agroécosystèmes (Pretty *et al.*, 2018). Pour tirer pleinement parti des processus écologiques comme la compétition, le parasitisme ou encore l'allélopathie par exemple, des stratégies de reconception sont nécessaires. Ce type de stratégie implique des changements profonds dans les systèmes de production contrairement aux stratégies d'efficacité et de substitution qui se basent sur les systèmes déjà existants (Pretty, 2020). L'objectif est de miser sur les processus agroécologiques et de mettre en place une combinaison de leviers pour permettre la fourniture de services écosystémiques (production alimentaire, maintien de la qualité des sols, stockage de CO<sub>2</sub>, ...) (Pretty *et al.*, 2018). La culture sous mulch permet, par exemple, de miser sur la compétition en empêchant la levée des adventices qui se retrouvent sans accès à la lumière. Dans ce type de stratégies, la gestion des communautés d'adventices est pensée à l'échelle de l'ensemble du système de culture et non plus à l'échelle de la campagne culturale. Une logique systémique avec des mesures de protection intégrée, basée sur plusieurs leviers et complémentaires aux autres stratégies, est mise en place dans l'optique de maintenir un système viable économiquement, mais répondant également aux enjeux environnementaux.

La démarche de conception-évaluation est un processus itératif comprenant plusieurs étapes (Figure 1). La première étape consiste à définir un cahier des charges à partir d'un ensemble de contraintes et d'objectifs. Ces objectifs s'inscrivent dans un territoire et permettent ainsi de répondre à des enjeux spécifiques. Cette étape permet d'explicitier la cible recherchée en définissant des

objectifs d'évaluation éventuellement chiffrés comme par exemple réduire de 50 % l'utilisation d'herbicides.

Suite à cette première étape, des prototypes de systèmes de cultures sont généralement co-conçus. Il existe plusieurs méthodologies de co-conception qui s'intègrent dans la démarche de conception-évaluation. Tout d'abord, la conception pas-à-pas qui a pour objectif une transition progressive vers des systèmes innovants. La démarche part d'un diagnostic agronomique qui permet de mettre en lumière les points à améliorer et ainsi de servir de base pour le processus de conception. L'adoption des techniques innovantes par les agriculteurs se fait au fur et à mesure, d'abord sur une seule parcelle par exemple. La démarche est répétée et s'intègre dans une spirale d'amélioration continue (Meynard *et al.*, 2012). La conception *de novo*, quant à elle, désigne des systèmes en rupture forte avec l'existant. L'objectif est de supprimer les contraintes pour ne pas restreindre l'inventivité et ainsi aboutir à des prototypes de systèmes de culture performants (Meynard *et al.*, 2012). Les prototypes sont ensuite évalués *ex ante* afin de mieux appréhender leur adéquation avec les objectifs initiaux. Suite à cette phase d'évaluation, le système de culture le plus prometteur est expérimenté au champ. Au fil des années, les objectifs évoluent, le prototype en place est réadapté et les règles de décision ajustées (Lançon *et al.*, 2008). Une évaluation *ex post* est également réalisée suite à cette phase d'expérimentation au champ afin de connaître les performances réelles du système.

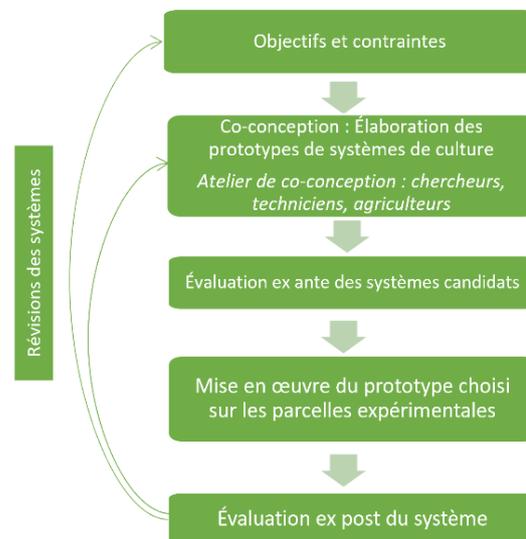


Figure 1 : Démarche de conception-évaluation de systèmes de culture ©Edwige Hermouet

L'expérimentation du système de culture au champ est une étape à part entière du processus de conception-évaluation. En effet, cette phase permet de tester la cohérence agronomique et la faisabilité technique du prototype co-conçu (Deytieux *et al.*, 2012). L'échelle du système de culture permet de prendre en considération l'ensemble des choix techniques dans une vision plus large qu'une campagne culturale unique et cela amène ainsi à tenir compte de la dépendance des actions entre elles. Cette approche systémique diffère de l'approche factorielle puisqu'ici c'est le système de culture dans son ensemble qui est étudié à l'échelle de la parcelle et non pas une seule composante comme c'est le cas dans les approches analytiques qui vont par exemple comparer deux dates de semis ou deux variétés toutes choses égales par ailleurs (Drinkwater, 2002). Le système de culture peut être testé sur un réseau de parcelle d'agriculteurs et/ou en station expérimentale. L'intérêt des dispositifs en station est qu'ils permettent un suivi plus approfondi du système et également une certaine prise de risque notamment dans le niveau de rupture comparé à ce qui pourrait être mis en place dans des exploitations agricoles (Debaeke *et al.*, 2008). L'évaluation multicritère qui découle ensuite de ces expérimentations permet d'analyser les performances agronomiques, socio-économiques et environnementales du système (Deytieux *et al.*, 2012). Elle vient alors compléter l'étape d'évaluation

*ex ante*. L'objectif est de parvenir à prendre en compte l'ensemble des dimensions de la durabilité afin de pouvoir évaluer les systèmes en se référant aux objectifs définis initialement.

Par la suite, la mise en place concrète chez les agriculteurs d'innovations co-conçues peut toutefois poser des difficultés selon le niveau de rupture des prototypes. Si la filière n'est pas en place pour la commercialisation d'une nouvelle culture ou si le système en rupture nécessite un matériel spécifique peu répandu, il y a en effet des risques que les agriculteurs ne s'approprient pas le système innovant, aussi prometteur soit-il. C'est dans ce contexte que s'est généralisée la notion d'innovations couplées. En effet, les innovations sont généralement pensées dans un domaine particulier alors même que la filière agricole regroupe un ensemble d'acteurs interconnectés. L'objectif désormais est de ne plus séparer la conception des systèmes de culture réalisée par les agriculteurs et la conception des intrants réalisée par l'agro-industrie mais plutôt d'envisager une émergence conjointe portée par les agriculteurs eux-mêmes (Salembier *et al.*, 2020). En effet, la démarche de conception-évaluation avec le prototypage de système de culture est souvent réalisée à dire d'experts alors même que les agriculteurs produisent des connaissances et innover dans leur système afin de répondre à leurs objectifs. L'agriculture de conservation s'est d'ailleurs développée via l'émergence de groupes d'agriculteurs pionniers. La formation de ce type de groupes illustre le manque de connaissances et le besoin de co-construire des références entre pairs (Lucas *et al.*, 2018). Les agriculteurs et plus largement les acteurs du monde agricole doivent faire partie intégrante des processus de reconception et être eux-mêmes des acteurs des processus d'innovation (Meynard *et al.*, 2012).

## Projet ALIAGE et Objectifs du stage

Le projet CASDAR ALIAGE (s'Appuyer sur Les Innovations couplées d'AGriculteurs pour soutenir l'Émergence de systèmes agricoles sans glyphosate), dans lequel s'intègre cette étude, est porté par la Fédération Nationale des CUMA (Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole). Il a pour objectif de produire des connaissances et des ressources pour l'action, via l'étude d'innovations couplées mises en place par les agriculteurs et la mise en œuvre d'un système de culture en station d'expérimentation. Dans le cadre du projet ALIAGE, les innovations couplées désignent des innovations à la fois au niveau des systèmes de culture, du machinisme et du collectif d'agriculteurs. Le projet s'intéresse à deux situations d'impasses techniques : les systèmes de grande culture sans labour et les systèmes de viticulture en pente qui ne seront pas étudiés ici. Cette étude s'intègre particulièrement dans l'axe du projet qui vise à accompagner l'émergence d'innovations couplées.

Dans le contexte d'une éventuelle suppression du glyphosate, où la culture de maïs est prégnante dans la région et où l'intérêt pour l'agriculture de conservation est grandissant, une démarche de co-conception a été mise en place sur la plateforme expérimentale de l'École d'Ingénieurs de Purpan. Cette démarche correspond à la phase de reconceptions des systèmes (Figure 1), elle s'intègre dans la démarche globale lancée depuis la création de la plateforme expérimentale et vise à mettre en place un système répondant aux enjeux du projet ALIAGE au sein de la plateforme.

L'intérêt de cette étude est d'évaluer des systèmes maïsicoles à deux moments clés de la démarche (Figure 1). D'une part, les systèmes maïsicoles en semis direct déjà en place sont comparés à la monoculture de maïs de référence. Cette évaluation multicritère *ex post* permet de mettre en exergue les atouts et les difficultés de ce type de système au regard d'une éventuelle suppression du glyphosate. Cette première phase d'état des lieux se révèle nécessaire et permet d'alimenter des pistes pour la reconception. En effet, cette étude a également pour but d'évaluer des prototypes de systèmes de culture répondant aux enjeux de sortie du glyphosate en agriculture de conservation des sols avant leur mise en place concrète. Ce dispositif d'évaluation *ex ante*, inscrit dans la démarche de co-conception mise en place sur la plateforme expérimentale, doit ainsi permettre d'apporter des réponses quant à la viabilité de ces systèmes avant leur mise en place sur le terrain.

Ainsi, cette étude s'intègre pleinement dans la démarche de conception-évaluation de systèmes de culture déjà en cours sur la plateforme expérimentale. Elle intervient à plusieurs étapes de la démarche (évaluation *ex post*, conception et évaluation *ex ante*) dans l'objectif de répondre à la question suivante : Quelles sont les performances de systèmes maïsicoles en réduction de travail du sol dans un contexte de suppression du glyphosate ?

## Matériels et Méthodes

### Site expérimental

Les essais suivis dans le cadre de cette étude sont mis en place au sein de la Station d'Expérimentations Agronomiques du Campus de Lamothe. Cette plateforme expérimentale appartient à l'École d'Ingénieurs de Purpan et est basée à Seysses au Sud-Ouest de Toulouse. Le climat de la région est un climat océanique altéré, influencé à la fois par l'Atlantique et la Méditerranée. Il en résulte des précipitations importantes au printemps notamment au mois de mai, un été chaud et sec puis un hiver doux (Giuliano *et al.*, 2016).

Le dispositif expérimental comporte 32 parcelles expérimentales de 12 m de large et 60 m de long, soit 720 m<sup>2</sup>. Les parcelles s'organisent en 2 blocs randomisés (Figure 2). Dans le cas des monocultures, elles sont mises en place sur 2 parcelles expérimentales, une dans chaque bloc. Dans le cas des rotations, chaque terme est présent chaque année toujours sur 2 parcelles expérimentales.

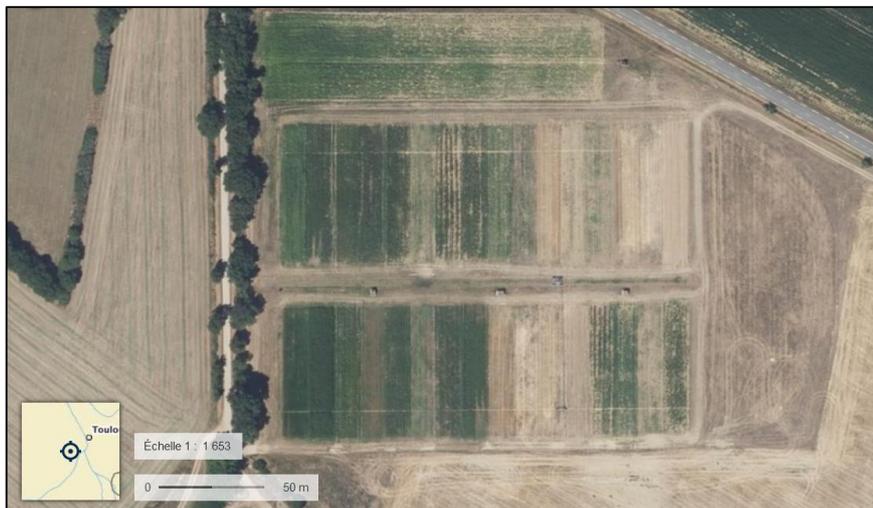


Figure 2 : Image satellite de la plateforme expérimentale © Géoportail (2022)

La texture moyenne de la couche arable est de 33.4 % d'argiles, 40.9 % de limons et 19.5 % de sables (Giuliano *et al.*, 2016). Elle n'est toutefois pas homogène entre les parcelles expérimentales. Il existe en effet un gradient d'argile d'Ouest en Est comme le montre la Figure 3. Concernant les parcelles des systèmes évalués ici, le pH varie entre 6.02 et 7.38, et la teneur en matière organique entre 1.82 et 2.16 % dans l'horizon 10-30 cm d'après les analyses réalisées en 2010, à la mise en place du dispositif.

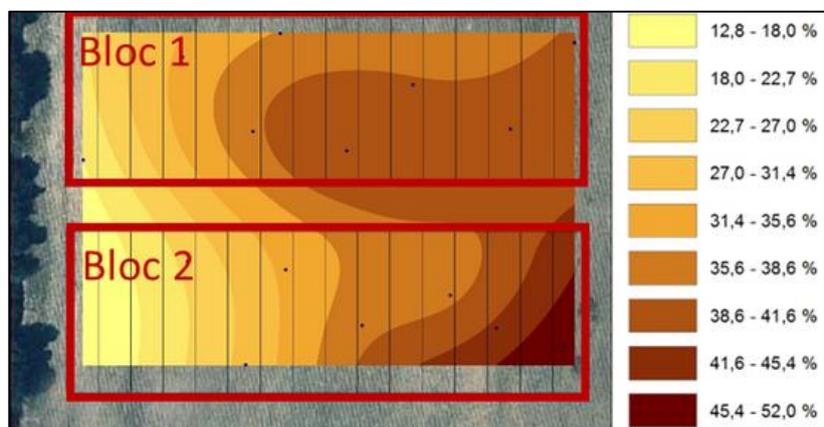


Figure 3 : Teneur en argile sur le dispositif expérimental © Simon Giuliano

## Description des systèmes existants

Depuis 2011, des systèmes de culture alternatifs à la monoculture de maïs conventionnelle sont testés sur la plateforme expérimentale. Dans cette étude, deux systèmes en semis direct sont comparés à la référence.

La référence (REF\_GRAIN) (Figure 4) correspond à une monoculture de maïs irriguée, conduite de manière conventionnelle. Les deux systèmes en semis direct (SD et SD\_MO) (Figure 5) sont également des monocultures de maïs irriguées. Un couvert d'interculture est semé et détruit uniquement le jour du semis (Tableau 1). Il est de composition variable selon les années mais correspond généralement à un mélange légumineuses/graminées avec une base de féverole toujours présente depuis 2013. En 2022-2023, le couvert était composé de seigle fourrager, pois fourrager et féverole d'hiver. Dans tous les cas, l'objectif reste d'avoir un couvert suffisamment dense pour contrôler le développement des adventices notamment pendant l'interculture puis pendant les premiers stades du maïs grâce à l'effet du mulch. L'intégration du couvert d'interculture permet de réduire les besoins en azote minéral, de même que le choix d'une variété demi-précoce permet d'économiser de l'eau d'irrigation. Le système SD\_MO (Semis Direct Matière Organique) diffère du système SD par l'apport de compost qui a été réalisé afin d'augmenter le taux de matière organique. En effet, au total ce sont plus de 300 t/ha de compost de déchets verts qui ont été amenés. L'apport a été réalisé en trois fois : 2013, 2014 et 2015.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des systèmes évalués ex post

	REF_GRAIN	SD	SD_MO
<b>Année de mise en place</b>	2010-2011	2010-2011	2013-2014
<b>Choix variétal</b>	Tardive	Demi-précoce	Demi-précoce
<b>Irrigation (mm/an)</b>	225 ± 43 mm	188 ± 44 mm	198 ± 35 mm
<b>Azote minéral (kg/ha/an)</b>	170 ± 37 kg/ha	136 ± 34 kg/ha	124 ± 51 kg/ha
<b>Interculture</b>	Labour à l'automne et sol nu	Couvert détruit au rouleau FACA	Couvert détruit au rouleau FACA



Figure 4 : Maïs (REF\_GRAIN) au 02 mai (semis le 07 avril) © Edwige Hermouet



Figure 5 : Maïs (SD) au 10 mai (semis le 28 avril) © Edwige Hermouet

## Description des systèmes issus des ateliers de co-conception

### Démarche de co-conception

Dans l'objectif de mettre en place un nouveau système de culture répondant aux enjeux du projet ALIAGE sur la plateforme expérimentale, un atelier de co-conception a été organisé. Ce nouveau système sera mis en place sur 5 parcelles expérimentales et répliqué en deux fois, offrant ainsi la possibilité d'avoir une rotation de 5 ans avec chacun des termes de la rotation présents chaque année.

L'atelier de co-conception s'est déroulé le lundi 27 mars au Campus de Lamothe. 15 participants étaient présents en plus des personnes dédiées à l'animation et à la prise de notes. La journée a réuni des profils variés : chercheurs, techniciens, agriculteurs... (Annexe 1). La cible globale de l'atelier a été définie en amont par l'équipe d'animation et était formulée comme suit :

### « Maîtrise des adventices et gestion des couverts dans un système de grande culture en ACS sans glyphosate. »

Étant donné le nombre important de participants, deux sous-groupes ont été formés avec deux sous-cibles différentes :

- Système 0 travail du sol (OTS) avec maintien des IFT<sub>Herbicide</sub> et - 50 % sur les IFT<sub>Hors Herbicide</sub>
- Système travail du sol réduit autorisé (TS) et - 50 % d'IFT<sub>Total</sub>

Les IFT sont comparés au système de monoculture de maïs conventionnelle qui correspond à notre référence (REF\_GRAIN). Le terme « réduit » désigne ici un travail du sol peu fréquent (pas plus de 2 passages par campagne culturale) et n'excédant pas 5 cm sauf dans le cas du strip-till qui est autorisé. De plus, un certain nombre de contraintes et d'objectifs ont été posés avant le début de l'atelier comme la volonté de maintenir un maïs dans la rotation du fait du contexte pédo-climatique et socio-économique de la station d'expérimentation, ou la durée de rotation maximale de 5 ans au vu du nombre de parcelles disponibles (Figure 6).

#### Contraintes et objectifs

- Rotation de grande culture de 3 à 5 ans dont 1 maïs
- Pas de sol nu
- Pas de S-métolachlore
- Matériel existant et réaliste : possibilité de simuler des actions car petites surfaces
- Adaptation face au changement climatique : moins irriguer mais valoriser irrigation en place
- Atténuation du changement climatique : réduction GES, stockage C

Figure 6 : Contraintes et objectifs fixés pour l'atelier de co-conception de systèmes de cultures



Figure 7 : Prototype issu de la journée d'atelier avec l'utilisation de la mallette Mission Ecophyt'Eau ©Alice Nidriche

L'objectif de l'atelier était d'aboutir à une rotation avec des itinéraires techniques (ITK) détaillés au maximum et qui répondait à la cible. Pour ce faire, les mallettes Mission Écophyt'Eau ont été utilisées afin de permettre une meilleure visualisation du prototype en construction (Figure 7). Par la suite, lorsque certaines informations manquaient dans les prototypes, le personnel de la plateforme a été sollicité pour compléter l'ITK de manière plus précise. Des experts de Terres Inovia ont également été interrogés à propos de cultures qui n'ont jamais été étudiées sur la plateforme expérimentale comme le colza ou le pois chiche.

## Description des systèmes co-conçus

Les deux systèmes sont donc des rotations de 5 ans. Dans les deux rotations, on retrouve du maïs, du blé, du colza et du soja (Figure 8 et 9). Le système OTS a la particularité de réaliser 6 cultures en 5 ans grâce au soja cultivé en dérobé derrière l'orge d'hiver. Les itinéraires techniques sont détaillés dans leur ensemble en Annexes (1 et 2).

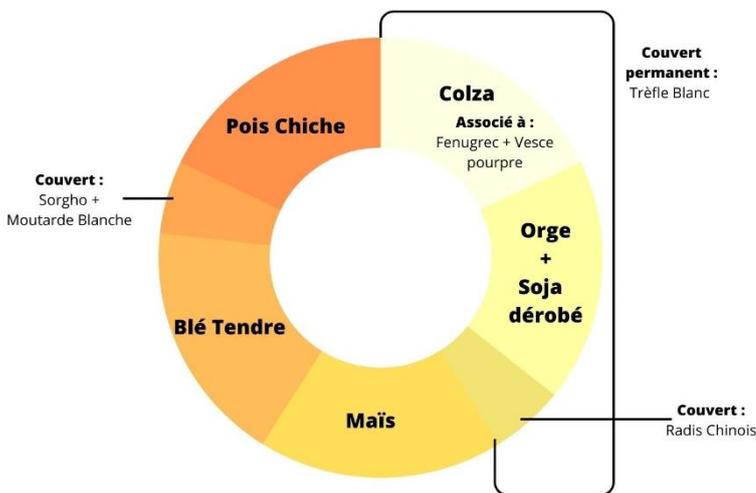


Figure 8 : Rotation du prototype OTS © Edwige Hermouet

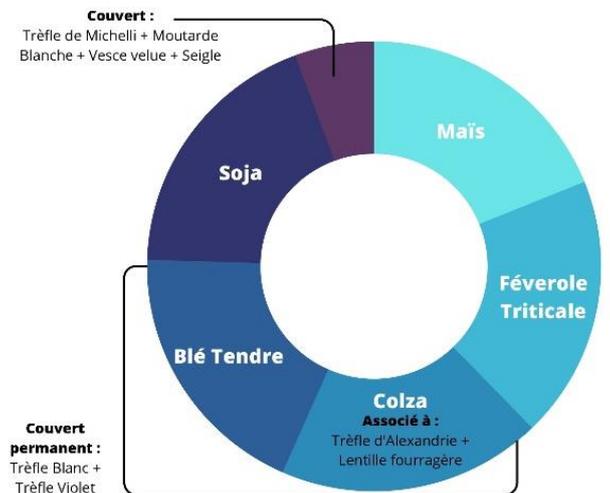


Figure 9 : Rotation du prototype TS © Edwige Hermouet

## Évaluation multicritère

Afin de réaliser une évaluation multicritère, des indicateurs agronomiques ont été utilisés et notamment le rendement en maïs grain (q/ha). Dans le cas de l'évaluation *ex post*, les épis de maïs sont prélevés sur 2 rangs le long d'un jalon de 2.4 m et ce sur 4 réplicats par parcelle. La biomasse d'adventices à floraison est également étudiée. Pour ce faire, des prélèvements sont réalisés chaque année. L'ensemble de la biomasse est prélevé sur des quadrats de 0.5 m<sup>2</sup> à raison de 4 quadrats par parcelle. Les échantillons sont ensuite triés par espèce avant d'être placés à l'étuve à 80 °C pendant 48h permettant ainsi d'obtenir la biomasse de matière sèche. La même méthodologie est employée pour la biomasse des couverts d'interculture. Dans le cas des prototypes co-conçus, un rendement a été estimé à dire d'experts au vu des itinéraires techniques envisagés. Les 3 experts interrogés sont des personnes internes qui connaissent la plateforme expérimentale et les potentiels de rendements : Mickaël Cazeneuve (Technicien), Valentin Deremetz (Ingénieur de recherche) et Simon Giuliano (Enseignant-chercheur). Ils ont été interrogés séparément et les résultats ont été moyennés.

Les données d'itinéraire technique sont toutes collectées depuis 2010 dans une base de données MicMac Utilitec, créée dans le cadre du projet de recherche ANR MicMac-Design, permettant de calculer différents indicateurs détaillés ci-dessous. Dans le cas des prototypes, les itinéraires ont été suffisamment détaillés pour que les données soient collectées dans la même base de données que les systèmes déjà en place.

Concernant les indicateurs socio-économiques, les charges sont calculées et réparties en deux catégories : les charges opérationnelles et les charges de mécanisation. Les charges opérationnelles (€/ha) comprennent le coût des semences, des produits phytosanitaires, de la fertilisation et de l'irrigation. Dans le cadre du système SD\_MO, les charges de compost ont été annualisées. En effet, étant donné que les apports ont eu lieu il y a près de 10 ans et qu'il n'est pas envisagé de refaire des apports dans les 20 prochaines années, il a été décidé de lisser cet apport sur 30 ans. Les charges liées au compost ont donc été annualisées en considérant un apport de 300 t/ha réparti en 10 t/ha tous les ans pendant donc 30 ans. Les charges de mécanisation (€/ha) comprennent les coûts associés à la

traction, qui prennent eux-mêmes en compte l'entretien, la réparation et l'amortissement, et les coûts de mécanisation associés à l'outil utilisé. Le coût du carburant (€/ha) est pris en compte dans un indicateur à part pour mieux discerner les différences selon les systèmes. La marge semi-nette (€/ha) est alors calculée en soustrayant au produit les charges opérationnelles, de mécanisation et le coût du carburant. Enfin, le temps de travail (h/ha) est également étudié et concerne uniquement le temps de travail dans la parcelle.

Des indicateurs environnementaux sont également étudiés. Tout d'abord, l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) a été calculé chaque année. L'IFT est un indicateur qui permet de comptabiliser le nombre de traitement réalisé à pleine dose sur une campagne culturale (MASA, 2022). Il s'obtient avec la formule suivante où T correspond à un traitement donné :

$$IFT = \sum_T \frac{(Dose\ appliquée)_T \times (Surface\ traitée)_T}{(Dose\ homologuée)_T \times Surface\ de\ la\ parcelle}$$

Il peut être décliné selon les catégories de produits phytosanitaires concernés : herbicides, fongicides, insecticides, ... L'IFT Herbicide sera particulièrement étudié au vu des problématiques adventices rencontrées sur le maïs. En effet, les herbicides représentent 79 % du nombre total de traitements réalisés en monoculture de maïs en France (Aymard *et al.*, 2014). Sur la plateforme expérimentale, ce sont d'ailleurs les seuls traitements réalisés sur le maïs mis à part le traitement de semences.

De plus, la quantité d'azote minéral (kg de N/ha) ainsi que la quantité d'eau apportée (mm) sont étudiées afin de comparer les intrants selon les systèmes. Les émissions de CO<sub>2</sub> (kg Eq, C-CO<sub>2</sub>/ha) sont également calculées. Elles comprennent les émissions liées à la mécanisation, à la production des engrais et les émissions de N<sub>2</sub>O issues des engrais azotés, à la production des pesticides et des semences, à l'installation du matériel d'irrigation et à l'action d'irrigation. Enfin, l'outil FEAT (Farm Energy Analysis Tool) a permis d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre des prototypes co-conçus (Version 1.2 ; Camargo *et al.*, 2013).

## Analyses des données

Le logiciel R (Version 4.2.2) a été utilisé pour l'analyse des données. Les résultats des indicateurs des systèmes déjà existants (REF\_GRAIN ; SD ; SD\_MO) ont été analysés grâce une Analyse en Composantes Principales (ACP). L'ACP est réalisé grâce aux packages *FactoMineR* et *factoextra*.

Des tests statistiques (ANOVA et tests de Tukey HSD grâce au package *agricolae*) ont ensuite été réalisés sur les données (2011-2022) des systèmes évalués *ex post* afin de juger de la significativité des différences entre les systèmes. Les tests sont interprétés au seuil  $\alpha = 0.05$ . Les graphiques ont été réalisés avec Excel ou le package *ggplot2* de R.

## Résultats

### Évaluation ex post des systèmes en semis direct

#### Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales, réalisée sur 13 variables, a permis de bien différencier les systèmes en semis direct de la référence (Figure 10A). Au total, plus de 45 % de la variabilité est représentée dans cette analyse : 31.7 % pour la dimension 1 et 14.0 % pour la dimension 3. Un point correspond à une parcelle expérimentale, il y a donc deux points par systèmes pour chaque année.

Le système REF\_GRAIN se distingue bien des systèmes en semis direct. En effet, tous les points se trouvent plutôt en bas à droite de la Figure 10A. Si l'on met cette figure en parallèle avec la Figure 10B qui représente le cercle des corrélations, on note que REF\_GRAIN est corrélé positivement aux variables suivantes : « Rendement », « N minéral », « Temps de travail » et négativement aux variables « Quantité de glyphosate utilisée », « Coût de production » et « Biomasse d'adventices à floraison » ... En revanche, les systèmes en semis direct sont plutôt corrélés positivement aux variables « Quantité de glyphosate utilisée », « Biomasse d'adventices à floraison », « Coût de production » et « IFT Herbicide ». Les points du système SD sont légèrement décalés vers la gauche par rapport à ceux du système SD\_MO témoignant d'une plus grande corrélation positive avec les variables « Quantité de glyphosate utilisée » « Coût de production » et « Biomasse d'adventices à floraison ». On note qu'il y a relativement peu de variabilité entre les parcelles en témoigne la proximité des points à leurs barycentres. En revanche, il existe bien une variabilité interannuelle. Les points correspondant à l'année 2015 sont tous placés en haut de la Figure 10A et ce particulièrement pour les systèmes en semis direct. En effet cette année-là a été marquée par une utilisation importante d'herbicides avec des IFT Herbicide à 4.50 pour SD et SD\_MO et 3.17 pour REF\_GRAIN. On retrouve également l'année 2020 où le contexte sanitaire particulier n'a pas permis la conduite optimale des cultures. Il apparaît toutefois difficile de percevoir une trajectoire des systèmes au fil des années.

#### Performance des systèmes

La Figure 11 permet de visualiser graphiquement les performances des systèmes en semis direct par rapport au système REF\_GRAIN. Les données sont exprimées en pourcentage, les résultats de la référence sont fixés à 100 % et les autres sont exprimés en fonction de la valeur obtenue pour la référence.

Les IFT Herbicide de SD\_MO ( $1.94 \pm 1.01$ ) et de REF\_GRAIN ( $1.91 \pm 0.84$ ) sont très similaires alors que le système SD utilise 30 % de traitements herbicides en plus ( $2.53 \pm 0.93$ ). De ce fait, le système SD ne remplit pas les objectifs initiaux concernant l'IFT Herbicide. On peut également noter que les systèmes en semis direct sont globalement moins consommateurs d'intrants que la référence, en témoignent les diminutions de fertilisation minérale et d'irrigation avec respectivement -27 % et -12 % dans le cas du système SD\_MO (Figure 11).

Par rapport à la référence ( $103 \pm 27$  q/ha) une baisse de rendement de l'ordre de 10 % est observée pour le système SD\_MO ( $92 \pm 29$  q/ha) et de 40 % pour le système SD ( $63 \pm 24$  q/ha) (Tableau 2). SD\_MO suit l'objectif initial d'une réduction maximale du rendement de 10 % alors que là encore, SD ne remplit pas l'objectif. Le rendement est significativement différent selon les systèmes ( $p < 10^{-4}$ ) et également selon les années ( $p < 10^{-4}$ ). Néanmoins, le rendement n'est pas significativement différent entre les systèmes SD\_MO et REF\_GRAIN ( $p = 0.065$ ). La moyenne régionale en Occitanie est de 96 q/ha sur les années de l'étude (Agreste). Les tendances de la région se retrouvent globalement dans les systèmes de la plateforme et on note que le rendement du système SD est, dans l'ensemble, nettement inférieur à la moyenne régionale (Figure 12).



Les tendances observées au niveau du rendement se retrouvent globalement au niveau de la marge semi-nette. En effet, la meilleure marge est obtenue sur le système de référence ( $414 \pm 438$  €/ha), elle est significativement supérieure à la marge du système SD\_MO ( $196 \pm 427$  €/ha). La marge semi-nette du système SD est négative en moyenne ( $-241$  €/ha  $\pm$  391) et elle est significativement différente des 2 autres systèmes (Tableau 2). L'objectif de maintenir la marge du système REF\_GRAIN n'est donc pas atteint que ce soit pour SD\_MO ou SD.

En revanche, les systèmes en semis direct divisent par deux le temps de travail ( $3.9 \pm 1.4$  h/ha pour SD et  $3.3 \pm 1.6$  h/ha pour SD\_MO) par rapport au système de référence ( $7.4 \pm 1.8$  h/ha) (Figure 11). Les différences sont significatives (Tableau 2) et illustrent l'intérêt des systèmes en semis direct dans la réduction du temps de travail.

Enfin, les coûts liés au carburant sont également divisés par deux sur les systèmes en semis direct et les émissions de gaz à effet de serre sont également réduites par rapport à la référence (Figure 11).

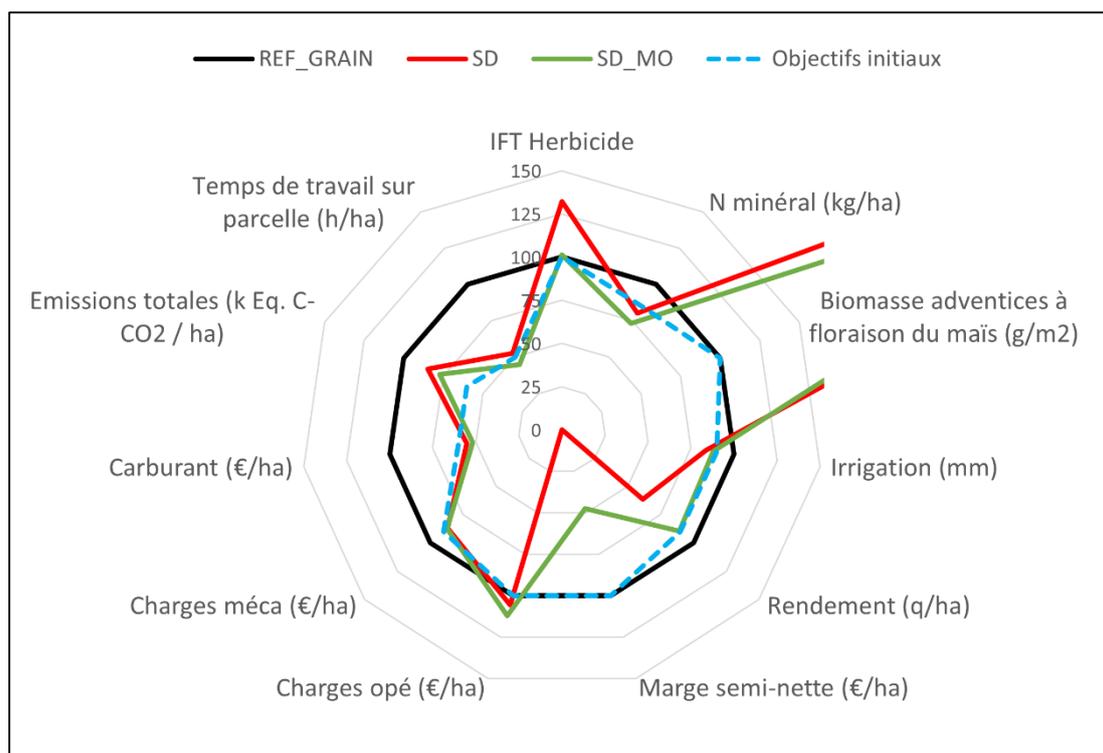


Figure 11 : Radar récapitulatif des performances des systèmes évalués. Les données sont exprimées en pourcentage par rapport au système de référence

Tableau 2 : Performances des systèmes selon différents indicateurs  
Les lettres indiquent les groupes d'après un test de Tukey-HSD ( $p < 0.05$ )

Système	IFT Herbicide	Rendement (q/ha)	Marge semi-nette (€/ha)	Temps de travail (h/ha)	Adventices à floraison (g/m <sup>2</sup> )
REF_GRAIN	$1.91 \pm 0.84$	$103 \pm 27$ a	$414 \pm 438$ a	$7.4 \pm 1.8$ a	$26 \pm 46$ a
SD	$2.53 \pm 0.93$	$63 \pm 24$ b	$-241 \pm 391$ b	$3.9 \pm 1.4$ b	$198 \pm 220$ b
SD_MO	$1.94 \pm 1.01$	$92 \pm 29$ a	$196 \pm 427$ c	$3.3 \pm 1.6$ c	$109 \pm 178$ c

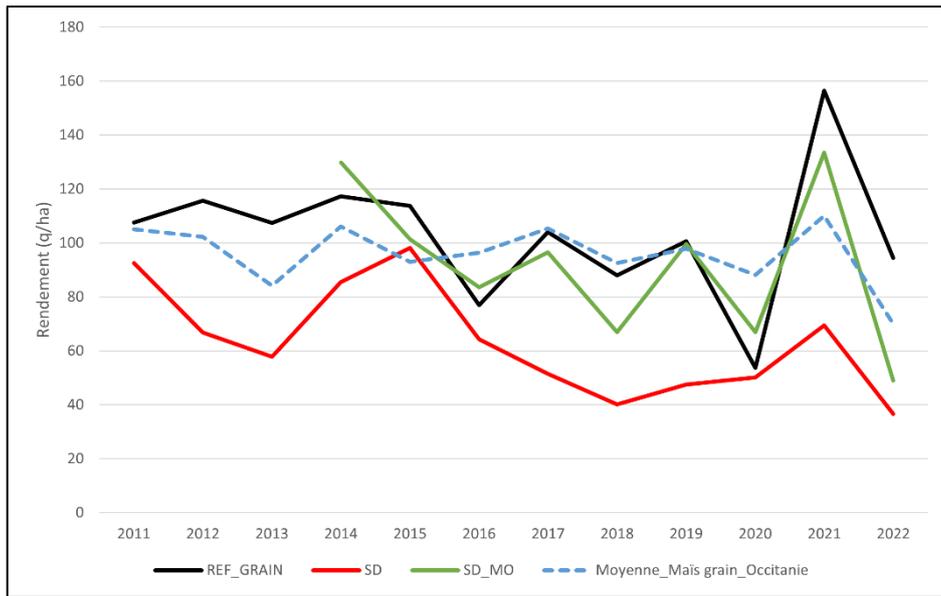


Figure 12 : Rendement en maïs grain (q/ha) selon les années et les systèmes

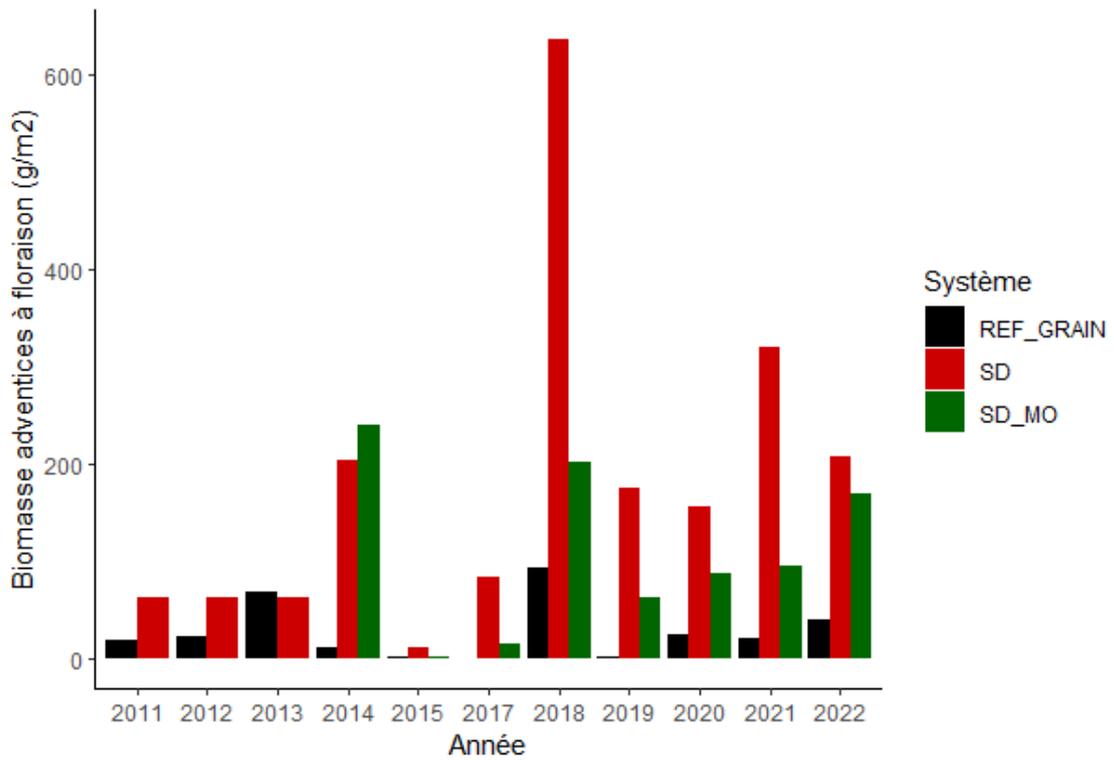


Figure 13 : Biomasse moyenne d'adventices à floraison selon les systèmes et par année d'étude (Données manquantes en 2016)

La biomasse d'adventices à floraison du maïs est significativement différente selon les systèmes ( $p < 10^{-4}$ ) et selon les années ( $p < 10^{-4}$ ). Elle est à 4 à 6 fois supérieure sur SD et SD\_MO ( $198 \pm 220 \text{ g/m}^2$  et  $109 \pm 178 \text{ g/m}^2$  respectivement) par rapport à la référence labourée ( $26 \pm 46 \text{ g/m}^2$ ) (Tableau 2). Les relevés ayant lieu depuis 2011, ils permettent d'avoir une vision dynamique de la flore adventice (Figure 13). Les pics les plus élevés se retrouvent en effet sur SD et SD\_MO illustrant des populations d'adventices non contrôlées (Figure 13). Une biomasse importante de panic-pied-de-coq (*Echinochloa crus-galli*), sétaire glauque (*Setaria pumila*) et digitale sanguine (*Digitaria sanguinalis*) est principalement retrouvée chaque année et plus particulièrement en 2018 où l'on obtient un pic de plus de  $600 \text{ g d'adventices/m}^2$  sur SD. Si l'on reprend la Figure 10A, on retrouve facilement l'année 2018 où les points sont situés du côté droit particulièrement pour SD et si l'on regarde la Figure 10B, on constate que cela correspond notamment à la variable « Biomasse d'adventice à floraison ».

Dans le contexte d'éventuelle suppression du glyphosate, ces systèmes ont été également évalués sous le prisme de leur utilisation de la molécule. Sur la référence, aucun glyphosate n'est utilisé étant donné l'absence de couvert d'interculture et le labour annuel. Ce sont uniquement des herbicides spécifiques à la gestion de la flore adventice du maïs qui sont utilisés. Sur les systèmes en semis direct en revanche, le glyphosate était utilisé de manière systématique mais, depuis 2017, une règle de décision s'applique. Le glyphosate est désormais appliqué juste après le semis du maïs uniquement si le couvert est peu développé et qu'il y a donc beaucoup d'adventices. L'objectif est de ne pas en avoir besoin, le glyphosate est utilisé ici en secours si le couvert n'a pas répondu aux attentes initiales. Au total depuis 2017, le système SD s'est passé de glyphosate seulement sur 2 années et pour 3 années sur le système SD\_MO. Le rendement a été comparé entre les années avec du glyphosate et les années sans pour SD et pour SD\_MO. Il ne varie pas de manière significative selon l'utilisation ou non de glyphosate ( $p = 0.87$  pour SD et  $p = 0.85$  pour SD\_MO). Concernant la biomasse des couverts d'interculture, elle est plus importante sur le système SD\_MO ( $4.68 \pm 2.44 \text{ t/ha}$ ) comparé au système SD ( $2.50 \pm 1.84 \text{ t/ha}$ ).

## Évaluation ex ante des prototypes co-conçus

### Performances des prototypes

La Figure 14 permet de visualiser graphiquement les performances des prototypes. Les prototypes (TS : Travail du Sol réduit et OTS : Pas de travail du sol) sont comparés à REF\_GRAIN. Les données sont exprimées en pourcentage en fonction de la valeur obtenue pour la référence.

Les deux prototypes permettent de réduire les traitements phytosanitaires (-77 % pour TS et -25 % pour OTS) (Figure 14). Les IFT sont moyennés à l'échelle de la rotation dans le cas des prototypes : sur le système TS, 0.81 traitements herbicides sont prévus par campagne culturale contre 1.66 sur le système OTS (Tableau 3). Les IFT Herbicide varient de 0 pour le mélange féverole/triticales et le soja à 1.71 pour le maïs sur le système TS. En revanche, sur le système OTS, les IFT Herbicide vont de 0.53 pour le colza à 3.40 pour l'orge et le soja en dérobé. Le système TS permet une plus grande réduction des traitements herbicides et il contient un seul traitement qui n'est pas herbicide contrairement au prototype OTS où la protection phytosanitaire est plus diversifiée avec des herbicides mais aussi des fongicides, insecticides et du traitement de semences.

Les prototypes permettent une diminution des apports en fertilisation azotée : -51 % et -39 % sur TS et OTS respectivement. Une réduction de la quantité d'eau apportée d'environ -75 % est également constatée (Figure 14). Là encore, les données sont moyennées sur la durée de la rotation. L'irrigation et la fertilisation minérale ne sont pas appliquées sur tous les termes de la rotation.

Les résultats concernant la marge semi-nette indiquent que les prototypes semblent solides d'un point de vue économique avec des marges de 594 et 593 €/ha respectivement pour TS et OTS comparé à la référence (414 €/ha) (Tableau 3). Les charges opérationnelles sont diminuées de 45 et 33 % par rapport à la référence sur les prototypes TS et OTS respectivement. De même que les charges

de mécanisation le sont de 32 et 29 %. Les charges de carburant sont quant à elles globalement équivalentes entre les prototypes et la référence autour de 80 €/ha (Tableau 3).

Le temps de travail de la référence (7.39 h/ha) est plus que divisé par 2 pour les prototypes (3.25 h/ha pour TS et 2.85 h/ha pour OTS) (Tableau 3).

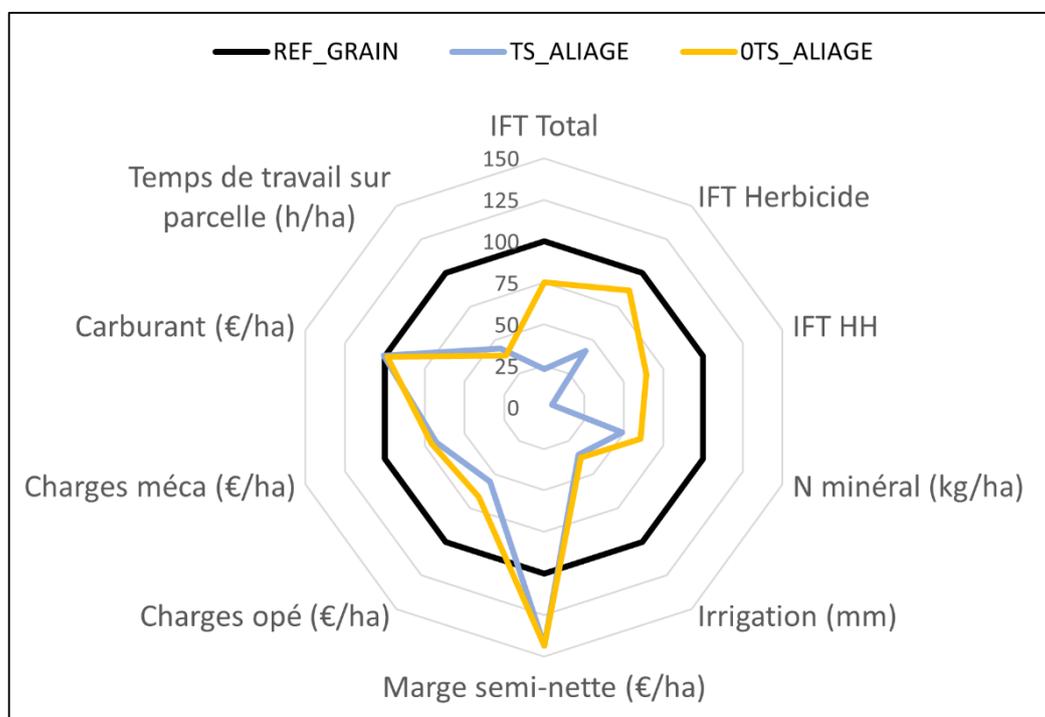


Figure 14 : Radar récapitulatif des performances des systèmes évalués ex ante. Les données sont exprimées en pourcentage par rapport au système de référence.

Tableau 3 : Performances des prototypes selon différents indicateurs

	REF_GRAIN	TS_ALIAGE	OTS_ALIAGE
<b>IFT TOTAL</b>	3.93	0.91	2.96
<b>IFT Herbicide</b>	1.91	0.81	1.66
<b>IFT Hors Herbicide</b>	2.02	0.10	1.30
<b>N minéral (kg/ha)</b>	170	83	103
<b>Irrigation (mm)</b>	225	79	84
<b>Marge semi-nette (€/ha)</b>	414	594	593
<b>Charges opérationnelles (€/ha)</b>	802	442	533
<b>Charges de mécanisation (€/ha)</b>	408	277	289
<b>Carburant (€/ha)</b>	80	80	78
<b>Temps de travail sur parcelle (h/ha)</b>	7.39	3.25	2.85

Les émissions de CO<sub>2</sub> sont diminuées sur les prototypes, elles passent d'environ 3500 kg CO<sub>2</sub>e/an sur la référence à environ 2000 kg CO<sub>2</sub>e/an pour les prototypes (Figure 15 et 16). En effet, toutes les cultures des 2 rotations ont des émissions inférieures à la référence. On remarque rapidement les cultures qui sont conduites sans apport de fertilisation minérale : pois chiche, association féverole/triticales et soja. Elles ont des émissions de gaz à effet de serre nettement plus faibles autour de 700, 720 et 1200 kg CO<sub>2</sub>e/an respectivement, du fait du coût en CO<sub>2</sub> important de la fabrication des engrais azotés.

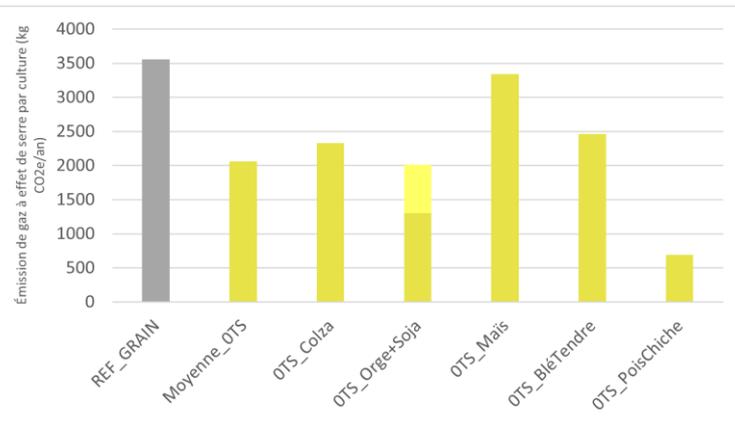


Figure 15 : Émissions de gaz à effet de serre en équivalent CO<sub>2</sub> pour le prototype OTS.

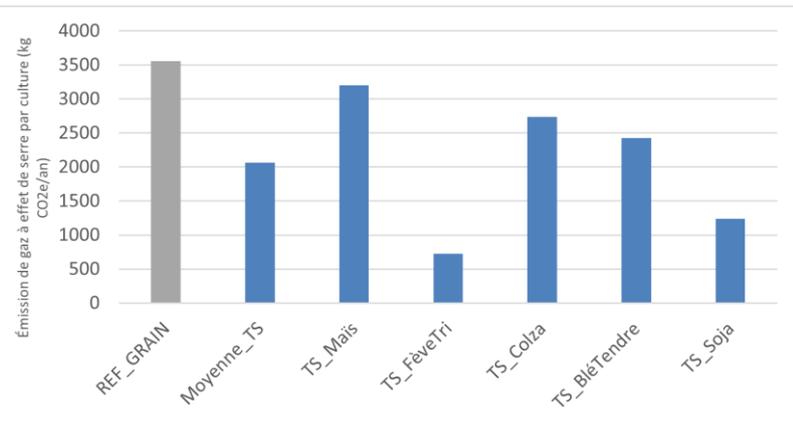


Figure 16 : Émissions de gaz à effet de serre en équivalent CO<sub>2</sub> pour le prototype TS.

Le Tableau 4 permet de se rendre compte plus en détail de la répartition de certains indicateurs pour chaque terme des rotations. Il permet notamment de voir quelle culture a le plus de poids sur la marge semi-nette de la rotation. Pour les deux prototypes, c'est le maïs qui permet d'établir la meilleure marge, à lui seul il représente 49 % de la marge du système TS et 47 % de celle de OTS. Un rendement minimal a ensuite été calculé afin de connaître le rendement nécessaire pour être rentable économiquement et les cultures « à risque » (Figure 17). Plus l'écart est grand entre le rendement théorique et le rendement minimal, plus la culture est rentable. Ce sont les cultures où des pertes de rendement liées à des conditions météorologiques ou des pressions adventices par exemple n'empêcheront pas la culture d'être rentable économiquement. C'est notamment le cas du maïs et ce, pour les deux prototypes. En revanche, les cultures que l'on peut qualifier de risquées sont les sojas et le pois chiche du prototype OTS (Figure 17).

Tableau 4 : Indicateurs détaillés selon chaque campagne culturale

Indicateurs	TS					OTS				
	Maïs	Féverole Triticale	Colza	Blé Tendre	Soja	Colza	Orge + Soja	Maïs	Blé Tendre	Pois Chiche
IFT Herbicide	1.71	0	1.51	0.80	0	0.53	3.40	2.57	0.80	1
IFT Total	1.71	0	2.01	0.80	0	1.53	5.40	3.57	1.30	3
Charges opérationnelles (€/ha)	621	140	486	310	652	406	734	791	329	407
Coût Carburant (€/ha)	92	61	67	80	102	65	124	62	61	79
Charges de mécanisation(€/ha)	397	184	240	191	374	291	431	337	182	205
Marge semi-nette (€/ha)	1447	369	256	695	202	220	445	1402	705	192

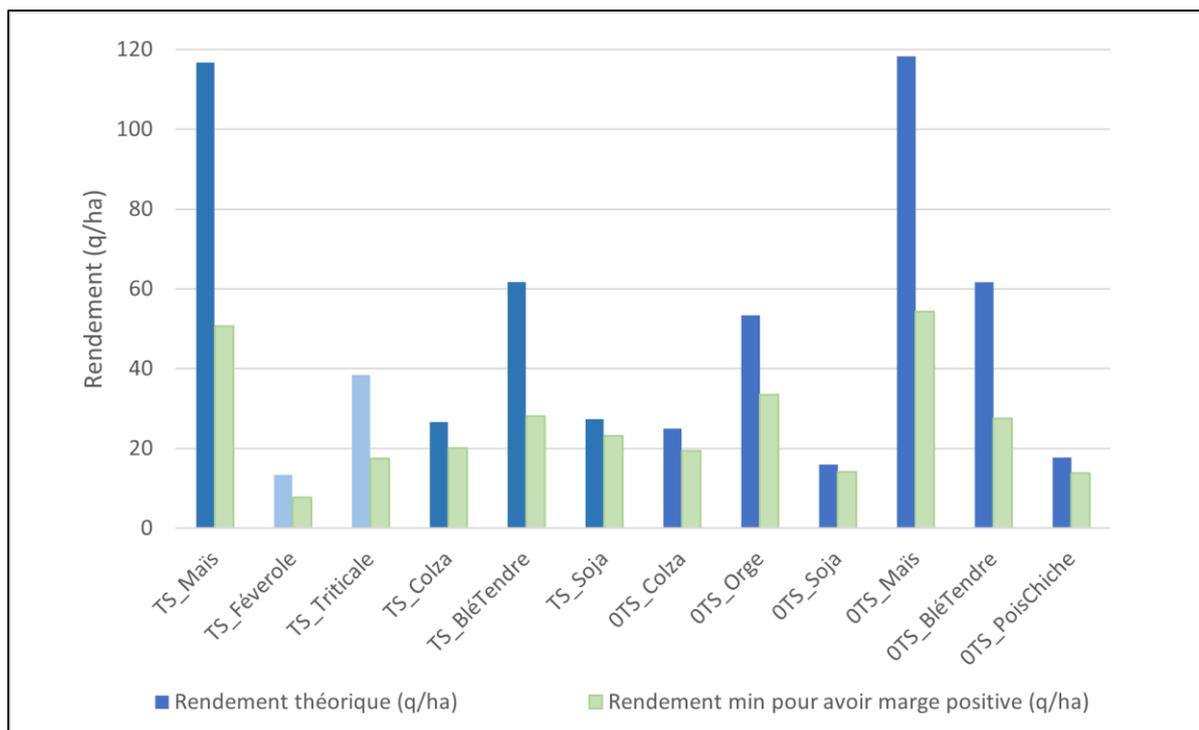


Figure 17 : Rendements théoriques et minimaux selon chaque terme de la rotation (Féverole et Triticale sont conduits en association)

#### Comparaison par rapport aux objectifs initiaux

Suite à cette première phase d'analyse des prototypes, les objectifs initiaux posés au moment de l'atelier ont été repris. La réalisation des objectifs a été vérifiée même si la plupart des objectifs ne comprenaient pas nécessairement de valeurs chiffrées. Les objectifs sont tous atteints pour le système TS (Tableau 6). En revanche, pour le système OTS, la diminution de l'IFT Hors Herbicide n'est pas à la hauteur des attentes initiales. Elle est de 36 % alors que l'objectif visé était une diminution de 50 % (Tableau 6).

Tableau 6 : Réalisation des objectifs initiaux selon les systèmes

Système	Objectif	Réalisation
TS_ALIAGE	- 50 % d'IFT	- 77 %
	Baisse Irrigation	- 75 %
	Réduction GES	- 43 %
	Rentabilité	+ 44 %
OTS_ALIAGE	- 50 % sur IFT HH	- 36 %
	Baisse Irrigation	- 73 %
	Réduction GES	- 33 %
	Rentabilité	+ 43 %

## Discussion

L'objectif de cette étude est d'évaluer différents systèmes de culture en travail du sol réduit dans un contexte d'éventuelle suppression du glyphosate à plusieurs moments de la démarche de conception-évaluation de systèmes de culture.

### Forces et faiblesses des systèmes en semis direct évalués *ex post*

Comme a pu le montrer l'évaluation *ex post*, le rendement est l'avantage du système REF\_GRAIN et cela lui permet ainsi d'obtenir une rentabilité satisfaisante comparée aux systèmes SD et SD\_MO. La réduction du travail du sol permet néanmoins de diminuer la consommation de carburants, les charges de mécanisation et le temps de travail comme a également pu le montrer le rapport de Carpentier *et al.* (2020). Le travail du sol, et notamment dans le cas des outils réalisant un travail profond, nécessite en effet une puissance de traction importante et une vitesse de passage plus faible si l'on compare à la pulvérisation d'herbicides par exemple (Carpentier *et al.*, 2020). Concernant le temps de travail, en plus du labour réalisé chaque année sur REF\_GRAIN qui dure environ 2.5 h/ha, il faut aussi prendre en compte l'ensemble de la préparation du lit de semences. Là où en un seul passage le couvert est roulé et le maïs semé sur SD et SD\_MO, il faut compter 3 passages d'outil avant le semis sur REF\_GRAIN : deux passages de herse plate et un passage de herse rotative en 2022 par exemple. L'arrêt du labour permet également de préserver le fonctionnement biologique et la structure des sols tout en augmentant les stocks de matière organique (Carpentier *et al.*, 2020). Des mesures réalisées sur le dispositif ont montré que sur la référence, le taux de matière organique reste homogène autour de 1.80 % selon les horizons 0-10 cm et 10-30 cm et au fil des années. En revanche, sur les systèmes SD, le taux de MO est variable selon les horizons. Il est plus élevé dans l'horizon 0-10 cm que dans l'horizon 10-30 cm. Sur SD\_MO, le taux de MO entre 0 et 10 cm atteint plus de 5 % soit plus du double de la valeur obtenue en 2010 du fait de l'apport massif de compost.

SD\_MO possède de meilleurs résultats que SD, que ce soit en termes de rendement (+ 29 q/ha), de marge semi-nette (+ 437 €/ha) ou de biomasse adventice (- 89 g/m<sup>2</sup>). Les itinéraires techniques sont pourtant similaires. Cela permet de mettre en évidence l'intérêt de l'apport de compost qui permet notamment de gagner près de 30 q/ha et d'obtenir ainsi un rendement qui n'est pas significativement différent de la référence. Ce résultat montre que semer du maïs en direct n'est pas incompatible avec l'obtention d'un rendement satisfaisant et qu'un tel système peut être viable. Toutefois, un apport de compost de cette ampleur n'est pas réaliste à l'échelle d'une exploitation agricole. Ici, c'est plus de 300 t/ha qui ont été apportées en 3 ans, il n'y a ainsi pas eu toute la phase de transition avec des apports de compost moins conséquents mais réguliers sur un plus grand nombre d'années. On pourrait ainsi se demander quelles auraient été les performances du système SD\_MO si des apports autour de 10 t/ha avaient été réalisés chaque année.

La dépendance aux herbicides des systèmes en semis direct est encore réelle comme en témoignent les IFT obtenus sur les systèmes SD et SD\_MO et la difficulté de se passer du glyphosate. Les objectifs initiaux ne sont en effet pas atteints sur SD en termes d'IFT Herbicide et sur SD\_MO, l'IFT Herbicide est simplement maintenu au niveau de REF\_GRAIN, il n'est pas diminué (Figure 11). Goulet & Vinck (2012) l'indiquent, « la pratique du semis direct repose sur la pulvérisation d'herbicides à base de matières actives comme le glyphosate, avant les semis, pour nettoyer les champs et le cas échéant pour détruire les plantes de couverture ». En effet, la réduction du travail du sol tend à favoriser le développement d'adventices, en particulier les graminées et les vivaces, comme c'est le cas dans les systèmes évalués ici, qui ne sont alors plus contrôlées par un travail du sol plus ou moins intense (Carpentier *et al.*, 2020). En effet, sur les parcelles des systèmes SD et SD\_MO, en plus de la classique problématique PSD (Panics, Sétaires, Digitaires) retrouvée en maïs, on retrouve aussi au fil du cycle cultural d'autres graminées comme la folle avoine (*Avena fatua*) et des vivaces comme le ray-grass (*Lolium sp.*) ou le liseron des champs (*Convolvulus arvensis*). Plusieurs études ont pu montrer que les

systèmes sans travail du sol peuvent posséder des communautés d'adventices plus diversifiées que les systèmes labourés, que ce soit en termes de richesse spécifique ou de richesse fonctionnelle. Les espèces vivaces et les espèces capables de germer toute l'année s'y développent principalement (Chauvel *et al.*, 2023 ; Murphy *et al.*, 2006 ; Zanin *et al.*, 1997). Cette évolution de la flore est à prendre en considération dans l'élaboration des stratégies de gestion des adventices. Le fait que les systèmes SD et SD\_MO soient des monocultures mène d'autant plus au développement de populations d'adventices spécifiques aux cultures de printemps qui sont alors maintenues à des niveaux plus ou moins acceptables grâce à l'utilisation d'herbicides. Diversifier la rotation en intégrant des cultures d'hiver permettra de diversifier également la communauté d'adventices et ainsi de réduire les espèces dominantes. De même, ajouter des dicotylédones dans la rotation permettra, en cas de désherbage chimique, d'utiliser d'autres molécules herbicides et ainsi de diversifier la lutte chimique. La gestion des adventices se fera alors à l'échelle de la rotation (Chauvel *et al.*, 2001).

Un des leviers testés pour gérer les adventices dans les systèmes évalués ici est l'utilisation d'un couvert d'interculture qui est ensuite roulé au moment du semis. L'objectif est d'avoir une biomasse importante au moment du roulage pour avoir un paillis suffisant. Des valeurs de 8 t de MS/ha sont considérées comme idéales, des valeurs de 5 à 6 t de MS/ha sont néanmoins considérées comme suffisantes (Labreuche *et al.*, 2019 ; Peigné *et al.*, 2023). Les biomasses des couverts n'atteignent pas les 5 t de MS/ha en moyenne et cela est d'autant plus vrai pour le système SD. Le fait que le couvert n'atteigne que rarement ces valeurs indicatives peut ainsi être un des facteurs explicatifs de l'abondance d'adventices retrouvée à floraison et illustre les difficultés techniques de la réussite des couverts. La question de la composition des couverts est tout d'abord essentielle. Des couverts de seigle peuvent être utilisés pour miser sur ses effets allélopathiques et sa capacité à produire une biomasse importante (Peigné *et al.*, 2022 ; Ryan *et al.*, 2021). Sur maïs, un mulch constitué uniquement de graminées aura néanmoins un ratio C : N trop élevé. Les micro-organismes, en consommant l'azote présent dans le sol, entraîneront probablement une faim d'azote pour le maïs (Ryan *et al.*, 2021). Les couverts de féverole pure testés sont moins compétitifs vis-à-vis du maïs et permettent ainsi sa meilleure implantation, de plus ils sont facilement détruits au rouleau. Mais, un couvert composé uniquement de légumineuses a tendance à se dégrader trop rapidement après le roulage, le mulch n'est pas assez épais pour empêcher le développement des adventices (Peigné *et al.*, 2022). Un compromis est donc à trouver, c'est ce qui est expérimenté sur SD et SD\_MO avec des compositions de couverts qui intègrent de la féverole mais aussi du pois et du seigle par exemple. Enfin, il est important de garder à l'esprit qu'une culture intermédiaire doit être conduite avec autant d'attention qu'une culture de rente si on souhaite qu'elle remplisse toutes ses fonctions et que le mulch produit n'aura pas nécessairement d'effets sur le rendement de la culture à l'année n mais à plus long terme il permettra d'améliorer la qualité de la parcelle pour les cultures suivantes (Ryan *et al.*, 2021).

La question du matériel est également primordiale et illustre toute l'importance du concept d'innovations couplées. En effet, une nouvelle pratique ne sera pas généralisée si le matériel n'est pas suffisamment adapté. Les agriculteurs peuvent ajuster les compositions de leurs couverts avec des espèces gélines afin que le couvert puisse être détruit simplement par le gel. Toutefois, dans le contexte actuel de dérèglement climatique, il apparaît compliqué de tout miser sur ce type de destruction, d'où le développement de nouveaux outils et notamment des rouleaux cranteurs type FACA. Le rouleau doit en effet permettre de pincer le couvert et de le coucher sans pour autant le broyer puisque l'objectif est de conserver un mulch qui va se dégrader lentement. Le rouleau doit avoir un poids suffisant pour permettre un roulage optimal et éviter que le couvert repousse derrière le roulage. De même, le semoir doit être adapté au semis direct dans des biomasses aussi conséquentes. Dans les systèmes SD et SD\_MO, la qualité du semis n'est pas optimale du fait du semoir qui ne referme pas suffisamment le sillon (Figure 18). Le risque est alors que la graine se retrouve dans une sorte de gouttière qui risque de s'assécher ou au contraire de se remplir d'eau selon la météo. La germination est alors compromise d'autant plus que la graine est ainsi plus visible des corbeaux par exemple. Une réflexion sur le matériel

à utiliser est donc menée pour trouver un compromis et refermer le sillon de semis sans pour autant priver la graine d'oxygène (Thomas, 2007).



Figure 18 : Photographie de la ligne de semis à J+4 du semis © Edwige Hermouet

Néanmoins, malgré le développement de nombreuses techniques, la maîtrise des adventices dans des systèmes en semis direct reste complexe comme on a pu le voir avec les biomasses très élevées des systèmes SD et SD\_MO qui ne correspondent pas aux attentes initiales. Détruire des graminées à partir du stade tallage jusqu'au stade montaison s'avère en effet très complexe sans labour et sans glyphosate. Le travail du sol superficiel peut être utilisé mais son efficacité dépend grandement des conditions météorologiques. Sans un climat séchant, le travail du sol n'aura que peu d'efficacité, il se pose alors la question des jours agronomiquement disponibles pour réaliser les interventions mécaniques dans des conditions optimales (Labreuche *et al.*, 2022). Là encore, le travail du sol superficiel doit s'inscrire dans un ensemble de leviers pour parvenir à gérer les populations d'adventices sans utiliser de glyphosate.

Enfin, la gestion des adventices passera également par une augmentation de la tolérance. Les adventices sont, au premier abord, considérées comme nuisibles, en témoigne le terme très répandu de « mauvaises herbes ». La nuisibilité est à la fois primaire via la compétition avec la culture en place mais aussi secondaire via l'augmentation du stock semencier (Caussanel, 1989). Toutefois, les adventices apportent également des effets positifs en remplissant notamment des services de pollinisation ou des services socio-culturels comme le maintien de la valeur des paysages via la survie de la flore sauvage (Bretagnolle & Gaba, 2015). L'objectif désormais pourrait être de passer d'une logique de contrôle systématique de la totalité des adventices à une logique de « vivre avec » tout en tenant évidemment compte de la nuisibilité des espèces considérées. Dans cette optique, il est important de garder à l'esprit que le rendement n'est pas significativement différent entre REF\_GRAIN et SD\_MO alors même que la biomasse adventice à floraison est en moyenne 4 fois supérieure sur SD\_MO. En effet, l'étude de Deremetz *et al.* (2023) a pu montrer que sur REF\_GRAIN et SD\_MO, il n'y a pas de corrélation entre le rendement en maïs et la biomasse adventice à floraison. La biomasse adventice n'induit pas vraiment de pertes de rendement. Ce type de résultat a aussi pu être mis en évidence dans d'autres études sur maïs comme celle de Ryan *et al.* (2009) où la biomasse d'adventices est significativement différente selon les systèmes testés contrairement au rendement. Espocito *et al.* (2023) développe ainsi le concept de « neutral weed communities » pour désigner ces communautés

d'adventices qui n'impactent pas significativement le rendement. Ces résultats peuvent s'expliquer notamment grâce à l'hypothèse de « Resource Pool Diversity ». En effet, selon cette hypothèse, il existe un gradient selon lequel plus le niveau de diversification augmente, plus la perte de rendement liée à la compétition avec les adventices pour les ressources du sol sera réduite. Une augmentation de la diversité spatio-temporelle des ressources disponibles permettrait ainsi d'avoir une meilleure complémentarité de niches entre culture et adventices (Smith *et al.*, 2010). En revanche, sur SD, il existe bien une corrélation négative entre le rendement et la biomasse adventice (Deremetz *et al.*, 2023). Sur SD\_MO, l'augmentation du taux de matière organique permise par l'apport de compost permet un fonctionnement biologique du sol d'autant plus intéressant et contribue ainsi à la diversification des ressources.

Aujourd'hui les systèmes en semis direct de la plateforme rencontrent des difficultés et ce d'autant plus pour le système SD. Les objectifs initiaux ne sont pas tous atteints, que ce soit en termes de rentabilité ou de maîtrise des adventices. Dans ce contexte, se tourner vers des systèmes plus diversifiés en sortant de la monoculture de maïs pour intégrer la réflexion dans une rotation apparaît nécessaire. C'est ce qui a été mis en place avec l'organisation de l'atelier de co-conception et l'évaluation *ex ante* des prototypes.

## Choix du prototype à expérimenter et limites de l'approche *ex ante*

Au vu des résultats de l'évaluation *ex ante* et de la faisabilité technique, c'est le prototype TS qui sera mis en place dès cet été sur la plateforme expérimentale. En effet, le système TS remplit en théorie les objectifs initiaux (Tableau 6). Ce prototype est d'autant plus intéressant d'un point de vue de la réduction des IFT. Hormis un insecticide sur le colza, uniquement des herbicides sont utilisés et le mélange féverole/triticales ainsi que le soja sont conduits sans produit phytosanitaire. Le prototype OTS quant à lui est moins intéressant sur cet aspect de réduction des produits phytosanitaires. De plus, la culture du pois chiche a été jugée risquée d'une part pour son caractère inédit sur la plateforme et d'autre part pour la date de semis. Le risque de ne pas pouvoir rentrer dans les parcelles à la date souhaitée initialement est présent. Le semis de pois chiche doit en effet se réaliser sur des sols bien ressuyés et non hydromorphes (Lambert, 2023). Enfin, l'enchaînement du blé après le maïs n'a pas été jugé très approprié d'un point de vue de la gestion de l'azote et également des risques de fusariose et de mycotoxines qui augmentent. En effet, derrière un maïs grain, une bonne gestion des résidus est essentielle, et ce d'autant plus en l'absence de labour, pour éviter que *Fusarium graminearum*, principal producteur de mycotoxines, ne s'y développe (Labreuche & Deschamps, 2016). Néanmoins, sur le prototype TS qui sera mis en place, des incertitudes subsistent quant à la réussite de certaines campagnes culturales. Le colza notamment n'a jamais été cultivé sur la plateforme expérimentale, ce n'est pas une culture maîtrisée comme peut l'être le maïs. Il a néanmoins déjà été cultivé sur l'exploitation agricole en place sur le Campus de Lamothe et ce sans soucis majeurs de ravageurs expliquant en partie le choix de maintenir un IFT faible (2.0) comparé à la moyenne nationale (7.8) (Agreste, 2020).

Les résultats de l'évaluation *ex ante* sont toutefois à prendre avec précaution particulièrement en ce qui concerne la marge semi-nette. En effet, le calcul a été réalisé avec des rendements définis à dire d'experts. Selon les conditions météorologiques et la réussite technique, il pourrait y avoir des écarts plus ou moins importants avec le rendement théorique qui a été fixé pour des conditions de culture relativement optimales. De même, la marge a été calculée avec les prix de vente actuels. Ceci permet notamment d'expliquer la marge très élevée des maïs étant donné que le prix de vente considéré pour l'évaluation *ex ante* était de 219 €/t. Si l'on prend par exemple un prix de vente à 130 €/t, qui correspond globalement aux prix des années 2015-2019, avec un rendement à 90 q/ha, proche de la moyenne du système SD\_MO, la marge du maïs passe alors à 60 €/ha contre plus de 1400 €/ha dans l'évaluation *ex ante*. Il y a aujourd'hui peu de visibilité à la fois sur les conditions météorologiques et sur les prix de vente pour les années à venir obligeant ainsi à la prudence lors de l'analyse des

résultats. Toutefois, pour les maïs, la réduction des charges opérationnelles avec la diminution des intrants et également la réduction des charges de mécanisation permettent d'expliquer les bons résultats économiques potentiels des prototypes, les charges étant en effet environ divisées par 2 (Tableau 3).

Une autre limite de l'approche *ex ante* est qu'elle ne permet pas de rendre compte de la dynamique de la flore adventice. Or, la biomasse adventice peut parfois être conséquente comme dans les systèmes en semis direct évalués *ex post*. Les solutions chimiques étant limitées du fait de la réduction importante des IFT, la gestion des adventices peut s'avérer délicate. Cela peut aller jusqu'à des pertes de rendements ou même jusqu'à une révision des objectifs notamment sur les IFT en cas d'impossibilité de maîtriser la flore adventice autrement. Pour pallier ces limites, il pourrait être intéressant de coupler cette évaluation *ex ante* à des outils de modélisations mécanistes. Le modèle STICS (Simulateur MULTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) permet de simuler la croissance des plantes et de fournir des éléments sur les composantes du rendement, le bilan hydrique ou encore le bilan azoté. Les données d'entrée sont relatives aux itinéraires techniques des systèmes évalués, au sol et au climat (Brisson *et al.*, 1998). Utiliser ce modèle permettrait notamment de donner une meilleure estimation des rendements prévisionnels. De même, afin de mieux évaluer la dynamique de la flore adventice, le modèle FLORSYS peut être utilisé. Ce modèle permet de simuler la croissance et la reproduction des cultures et des adventices au jour le jour sur des parcelles virtuelles à partir là encore des données du système de culture et du climat (Colbach *et al.*, 2019). Le modèle peut permettre d'évaluer différentes rotations et de voir ainsi les effets sur la dynamique des adventices. L'outil FLORSYS a été modifié de telle sorte qu'il devienne également un outil d'aide à la décision (DECIFLORSYS) pouvant être utilisé lors d'ateliers de co-conception (Colbach *et al.*, 2019). DECIFLORSYS est ainsi composé de grille de conseils, d'arbres de décisions et d'un calculateur permettant d'évaluer rapidement différents systèmes. Les opérations culturales ne sont pas autant détaillées que sur FLORSYS mais elles sont plutôt agrégées sous forme par exemple de proportion de cultures de printemps ou de fréquence de labour (Colbach *et al.*, 2019). Cet outil permet ainsi de voir immédiatement les effets d'une modification de pratiques sur la performance des systèmes et pourrait être pertinent à utiliser dans le cadre d'une prochaine reconception.

## Niveau de rupture des prototypes

Un des objectifs du projet ALIAGE est d'accompagner l'émergence d'innovations couplées. L'atelier de co-conception organisé au Campus de Lamothe avait pour but de mettre en place un système en rupture sur la plateforme expérimentale. Toutefois, on constate que dans les rotations conçues les cultures restent globalement classiques avec maïs, blé, colza et soja dans les 2 prototypes. Il y a finalement peu de diversification hormis avec le pois chiche du prototype OTS. La prise de risque est donc faible du point de vue de la rotation. Néanmoins, la réduction drastique des IFT et l'utilisation de couverts permanents de trèfles par exemple restent des attentes ambitieuses. L'objectif de ce système est qu'il puisse produire des références pour permettre ensuite de communiquer sur ces performances. Si le prototype s'avère performant au champ, la question de l'intégration des pratiques chez les agriculteurs et de la diffusion du système se posera nécessairement. Dans ce contexte, avoir une rotation avec des cultures retrouvées chez les agriculteurs aux alentours pourra permettre de faciliter l'intégration des pratiques et le partage d'expériences. Au cours de l'atelier, deux agriculteurs étaient présents, tous deux engagés dans la réduction du travail du sol et également dans la réduction des produits phytosanitaires puisque l'un d'entre eux est en agriculture biologique. Un plus grand nombre d'agriculteurs aurait éventuellement pu permettre d'avoir plus de retours d'expériences sur ce qu'ils testaient déjà chez eux et ce qu'ils auraient envie de voir tester dans une plateforme expérimentale qui peut se permettre une prise de risque plus importante qu'une exploitation agricole. Dans le cadre du projet ALIAGE, des groupes d'agriculteurs sont suivis dans le Grand Est et la même démarche de co-conception y est mise en place avec pour objectif que les agriculteurs investis dans le projet mettent en place un système sans glyphosate et en travail du sol réduit sur leurs parcelles. Des

ateliers ont eu lieu avec uniquement des agriculteurs. Les prototypes co-conçus restent alors globalement dans la lignée des stratégies déjà en place sur leurs exploitations. Le niveau de rupture des prototypes semble ainsi dépendre grandement du profil des participants et du contexte de l'atelier. Si les agriculteurs doivent mettre en place le prototype sur leurs parcelles, sans compensation économique en cas d'échec, ils auront nécessairement plus de difficultés à se tourner vers des techniques très en rupture qu'ils ne maîtrisent probablement pas ou peu.

Le projet ALIAGE s'intéresse spécifiquement aux systèmes de grande culture en agriculture de conservation des sols. Ici, le choix a été fait de concevoir des prototypes à des degrés de travail du sol différents, posant ainsi la question de la place du travail du sol. Dans le prototype OTS, donc sans aucun travail du sol hormis celui du semoir, les adventices, les repousses de culture et les couverts sont gérés principalement via l'usage du broyeur, du rouleau FACA et des herbicides. Dans le prototype TS, un travail du sol à 5 cm maximum a été autorisé permettant ainsi la mise en place de désherbage mécanique notamment sur le soja et également sur l'association féverole/triticales. Intégrer une part de travail du sol permet de diversifier les leviers d'actions pour parvenir à maîtriser adventices et couverts. Le travail du sol peut ainsi s'intégrer dans une stratégie globale et ainsi permettre de réduire les IFT comme c'est le cas sur le prototype TS. Cette diversification des stratégies fait référence au concept de « many little hammers » selon lequel une combinaison de leviers peut s'avérer efficace même si les leviers sont à eux seuls potentiellement peu efficaces (Liebmann *et al.*, 1997). La question de la fréquence et de la profondeur idéale de travail du sol se pose alors. Des études s'intéressent notamment au labour stratégique. Réintégrer un labour positionné de manière stratégique dans la rotation peut ainsi permettre de réduire la pression adventice notamment dans l'année qui suit le labour (Crawford *et al.*, 2015 ; Dang *et al.*, 2017). Le travail du sol est cité comme une alternative au glyphosate dans plusieurs cas de figures dans le rapport de Reboud *et al.* (2017) : la destruction des couverts, la lutte contre les vivaces avec des déchaumages par exemple ou la préparation du sol avant le semis. L'intégralité des agriculteurs du réseau DEPHY cite le travail du sol comme levier majeur qui leur a permis de se passer de glyphosate (Reboud *et al.*, 2017). Néanmoins, les interventions de travail du sol doivent se faire dans des conditions de sol et météorologiques optimales pour être efficaces (Carpentier *et al.*, 2020). Le choix de l'outil, de la profondeur, de la vitesse de passage, de la date d'intervention est en effet à raisonner selon le contexte pédoclimatique des parcelles. La plateforme CA-SYS expérimente elle aussi des systèmes de culture agroécologiques en périphérie de Dijon. L'ambition est de parvenir à gérer les bioagresseurs sans pesticides. Deux systèmes en semis direct sont évalués. Ils font aujourd'hui face à des difficultés et notamment des problématiques de ray-grass et de chardons qui les amènent à repenser le rôle du travail du sol dans les systèmes sans labour.

L'absence totale de lien avec l'élevage peut également poser question quant au niveau de rupture du prototype qui sera mis en place sur la plateforme. En effet, c'était un choix de rester dans un cadre uniquement de grande culture de part la vocation de la plateforme expérimentale. Néanmoins, sur le Campus de Lamothe, une exploitation agricole avec un troupeau d'une centaine de Prim'Holstein est en place ainsi qu'un dispositif de méthanisation. Il pourrait donc être envisagé de renforcer le lien entre l'exploitation et la plateforme expérimentale via des projets de recherche plus globaux. Des apports de lisier, de digestat et même du pâturage pour la destruction des couverts pourraient être mis en place. Ce type de projet incluant le troupeau ajoute toutefois une complexité de mise en œuvre et ce d'autant plus sur des parcelles de 720m<sup>2</sup> et impliquerait également une réorganisation des équipes. Pour autant, des projets mêlant expérimentation système en grande culture et élevage existe. C'est le cas du projet ABC (Agroécologie en Bourgogne et région Centre) qui possède un site associé à de l'élevage ovin près de Bourges en plus de la plateforme CA-SYS (Deytieux, 2018).

## Conclusion

Bien qu'ils permettent de réduire le temps de travail et les charges de carburant, les systèmes en semis direct évalués *ex post* n'atteignent pas l'ensemble des objectifs initiaux. Le système SD\_MO montre néanmoins de meilleures performances que le système SD notamment en termes de rendement (+ 29 q/ha) et de marge semi-nette (+ 437 €/ha). Ces deux systèmes en monoculture restent dépendants des herbicides pour la gestion des adventices avec des IFT Herbicide moyen à 1.94 et 2.53. La phase de reconception des systèmes a ainsi permis de proposer des prototypes continuant dans cette dynamique de réduction du travail du sol en mobilisant aussi les autres piliers de l'agriculture de conservation des sols. Les prototypes s'inscrivent en effet dans une rotation et la couverture des sols a été pensée de manière plus poussée que sur SD et SD\_MO et ce tout en réfléchissant à la réduction des traitements phytosanitaires et notamment du glyphosate.

Les deux systèmes co-conçus montrent de meilleures performances que ce soit pour les indicateurs socio-économiques ou environnementaux. L'intégration d'une combinaison de leviers (rotation, couverts d'interculture et permanents, association variétale, ...) permettrait d'améliorer les performances des systèmes. La mise en place du prototype choisi et son suivi au fil des années permettra de mieux cerner sa pertinence vis-à-vis des objectifs de réduction de travail du sol et de suppression du glyphosate. Les indicateurs agronomiques (rendement, biomasse adventice) qui seront mesurés permettront de compléter la phase d'évaluation *ex ante* qui a été réalisée ici.

La mise en place de ce système a permis la rencontre d'une diversité d'acteurs du territoire impliqués sur ces questions de transition agroécologique. Cette dimension collective, au cœur de la notion d'innovations couplées et du projet ALIAGE, est à maintenir et à consolider. Renforcer le lien entre agriculteurs, techniciens, chercheurs et l'ensemble des acteurs concernés ne peut être que fructueux dans ce contexte où le monde agricole fait face à de nombreux enjeux. Maintenir des dispositifs expérimentaux comme celui-ci, où des systèmes de cultures innovants sont testés, apparaît essentiel. Ces systèmes testés doivent s'intégrer pleinement dans la dynamique locale du territoire et être source d'échanges et de réflexions pour les acteurs concernés et notamment les agriculteurs. La démarche de conception-évaluation de systèmes de culture peut et doit intégrer une diversité d'acteurs et ce à différents moments de la démarche. La conception des prototypes permet en effet de mobiliser des acteurs variés mais ces acteurs peuvent également être impliqués dans le suivi du système au fil des années avec des visites à des moments clés et également au moment de la révision des objectifs initiaux. L'ensemble de la démarche de conception-évaluation de systèmes de culture doit ainsi être vu comme un outil pour parvenir à répondre aux défis actuels du monde agricole et notamment au défi de la sortie des pesticides.

## **Bibliographie**

AGRESTE (2020) Enquête pratiques culturales en grandes cultures et prairies 2017. Principaux résultats.

ANSES (2019) Glyphosate : l'ANSES fait le point sur les données de surveillance. <https://www.anses.fr/fr/content/glyphosate-l%E2%80%99anses-fait-le-point-sur-les-donn%C3%A9es-de-surveillance>

ANSES (2023) Glyphosate. E-Phy <https://ephy.anses.fr/substance/glyphosate>

Antier, C., Andersson, R., Auskalnienė, O., Barić, K., Baret, P., Besenhofer, G., Calha, I., Carrola Dos Santos, S., De Cauwer, B., Chachalis, D., Dorner, Z., Follak, S., Forristal, D., Gaskov, S., Gonzalez Andujar, J. L., Hull, R., Jalli, H., Kierzek, R., & al. (2020). A survey on the uses of glyphosate in European countries. *INRAE*. <https://doi.org/10.15454/A30K-D531>

Aymard D., Cassagne J.P., Sablik M.C. (2014) Mémento agricole du bassin Adour-Garonne. *Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt*.

Benbrook C. (2016) Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environmental Sciences Europe*, 28,3.

Bonin L., Duyme F., Wissocq A., Jouy L., Labreuche J. (2021) Limitation des usages : les systèmes sans labour ont besoin d'alternatives. *Perspectives agricoles*, 484.

Bretagnolle V., Gaba S. (2015) Weed for bees ? A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 891-909.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Mached J.M., Meynard J.M., Delécolle R. (1998) STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.

Camargo G.G.T., Ryan M.R., Richard T.L. (2013) Energy use and greenhouse gas emissions from crop production using the farm energy analysis tool. *BioScience*, 63, 4, 263-273.

Carpentier A., Fadhuile A., Roignant M., Blanck M., Reboud X., Jacquet F., Huyghe C. (2020) Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Évaluation économique. *INRAE*. 161 p.

Carter M.R., Sanderson J.B., Ivany J.A., White R.P. (2002) Influence of rotation and tillage on forage maize productivity, weed species, and soil quality of a fine sandy loam in the cool-humid climate of Atlantic Canada. *Soil and Tillage Research*, 67, 85-98.

Caussanel J.P. (1989) Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle : situation de concurrence bispécifique. *Agronomie*, 219-240.

Cellule d'Animation Nationale DEPHY. (2018) Le glyphosate dans le réseau DEPHY FERME. État des lieux des usages, des freins et des alternatives. *Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto*, 62p.

Centre International de Recherche sur le Cancer. (2015) IARC Monograph on Glyphosate. <https://www.iarc.who.int/featured-news/media-centre-iarc-news-glyphosate/>

Chauvel B. *et al* (2023) Quelles adventices en agriculture de conservation des sols ? *Phytoma*, 761.

Chauvel B., Guillemain J.P., Colbach N., Gasquez J. (2001) Evaluation of cropping systems for management of herbicide-resistant populations of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Crop Protection*, 20, 127-137.

Chégut M., Hardy C., Lebarbier R., Marot M.F., Martin E., Nicolai L. (2018) Agreste Filière maïs grain Nouvelle-Aquitaine. Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt.

Chen X., Thorp K.R., Ouyang Z., Hou Y., Zhou B., Li Y. (2019) Energy consumption due to groundwater pumping for irrigation in the North China Plain. *Science of the Total Environment*, 669, 1033-1042.

Colbach N., Cordeau S., Queyrel W., Maillot T., Villerd J., Moreau D. (2019) Du champ virtuel au champ réel – ou comment utiliser un modèle de simulation pour diagnostiquer des stratégies durables de gestion des adventices et reconcevoir des systèmes de culture ? *Agronomie, environnement et sociétés*, 9, 111-128.

Crawford M.H., Rincon-Florez V., Balzer A., Dang Y.P., Carvalhais L.C., Liu H., Schenk P. (2015) Changes in the soil quality attributes of continuous no-till farming systems following a strategic tillage. *Soil Research*, 53, 263-273.

Dang Y.P., Balzer A., Crawford M., Rincon-Florez V., Liu H., Rowena Melland A., Antille D., Kodur S., Bell M.J., Milroy Whish J.P., Lai Y., Seymour N., Carvalhais L.C., Schenk P. (2017) Strategic tillage in conservation agricultural systems of north-eastern Australia : why, where, when and how ? *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 1000-1015.

Debaeke P., Petit M.S., Bertrand M., Mischler P., Munier-Jolain N., Nolot J.M., Reau R., Verjux N. (2008) Évaluation des systèmes de culture en stations et en exploitations agricoles. *Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri Editions*, 978-2-84444-685-5.

Deremetz V., Adeux G., Cordeau S., Giuliano S. (2023) Les relations adventices-culture sont-elles différentes dans des systèmes de culture alternatifs à la monoculture de maïs conventionnelle ? *Végéphyll – 25<sup>ème</sup> conférence du COLUMA*

Deytieux V. (2018) Projet « Agroécologie en Bourgogne et région Centre ». *INRAE*

Deytieux V., Vivier C., Minette S., Nolot J.M., Pinaud S., Schaub A., Lande N., Petit M.S., Reau R., Fourrié L., Fontaine L. (2012) Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. *Innovations Agronomiques*, 20, 49-78.

Drinkwater L.E. (2002) Cropping systems research : reconsidering agricultural experimental approaches. *Horttechnology*, 12, 355-361.

Duke S. (2018) The history and current status of glyphosate. *Pest Management Science*, 74, 1027-1034.

Duke S., Powles S. (2008) Glyphosate : a once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science*, 64, 319-325.

Eriksen-Hamel N.S., Speratti A.B., Whalen J.K., Légère A., Madramootoo C.A. (2009) Earthworm populations and growth rates related to long-term crop residue and tillage management. *Soil and Tillage Research*, 104, 311-316.

Espagnol G. (2015) Monoculture de maïs, une pratique adaptée à certains contextes. *Perspectives agricoles*, 426.

Espocito M., Westbrook A.S., Maggio A., Cirillo V., DiTommaso A. (2023) Neutral weed communities : the intersection between crop productivity, biodiversity, and weed ecosystem services. *Weed Science*, doi : 10.1017/wsc.2023.27.

European Food Safety Authority (2015) Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance glyphosate.

Food and Agricultural Organisation of the United Nations. (2022) L'agriculture de conservation. <https://www.fao.org/3/cb8350fr/cb8350fr.pdf>

FoodWatch France. (2023) En finir avec le glyphosate en Europe... enfin ! <https://www.foodwatch.org/fr/sinformer/nos-campagnes/alimentation-et-sante/pesticides/petition-pour-interdiction-du-glyphosate-en-europe-en-2022>

Ghidey F., Blanchard P.E., Lerch R.N., Kitchen N.R., Alberts E.E., Sadler E.J. (2005) Measurement and simulation of herbicide transport from the corn phase of three cropping systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60, 260-273.

Giuliano S. (2023) Évaluation multicritère des performances de systèmes de culture maïsicoles alternatifs à la monoculture de maïs conventionnelle et à faible impact sur l'environnement. *Thèse. UMR 1248 AGIR INRAE-INP Toulouse*

Giuliano S., Alletto L., Deswarte C., Perdrieux F., Daydé J., Debaeke P. (2021) Reducing herbicide use and leaching in agronomically performant maize-based cropping systems : an 8-year study. *Science of the Total Environment*, 788, 147695.

Giuliano S., Ryan M., Véricel G., Rametti G., Perdrieux F., Justes E., Alletto L. (2016) Low-input cropping systems to reduce input dependency and environmental impacts in maize production : a multi-criteria assessment. *European Journal of Agronomy*, 76, 160-175.

Goulet F., Vinck D. (2012) L'innovation par retrait. Contribution à une sociologie du détachement. *Revue française de sociologie*, 53, 195-224.

Haddaway N.R., Hedlund K., Jackson L.E., Kätterer T., Lugato E., Thomsen I.K, Jorgensen H.B., Isberg P. (2017) How does tillage intensity affect soil organic carbon ? A systematic review. *Environmental Evidence* 6:30.

Labreuche J., Deschamps T. (2016) Après la récolte – Le broyage des résidus de maïs réduit les risques de contamination en DON. Article Arvalis. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/le-broyage-des-residus-de-mais-reduit-les-risques-de-contamination-en-don>

Labreuche J., Eschenbrenner G. (2011) Préparation du sol, Non labour : une technique à manier avec précaution. *Perspectives agricoles*, 377.

Labreuche J., Le Souder C., Castillon P., Ouvry J.F., Real B., Germon J.C., de Tourdonnet S. (2007) Évaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles sans labour (TCSL) en France. *ADEME*, 04 75C 0014.

Labreuche J., Perriot B., Gautellier Vizios L., Brun D., Uijtewaal A., Bonin L., Vuillemin F., Duroueix F., Duval R., Royer C., Buridant C., Rodriguez A. (2019) Glyphosate : peut-on s'en passer et avec quelles conséquences ? *Perspectives agricoles*, 468, 41-48.

Labreuche J., Naudet V., De Balathier H., Vuillemin F. (2022) Étude de systèmes de culture alternatifs aux herbicides avec ou sans labour dans l'essai A de Boigneville (91). *Phloème – 3<sup>ème</sup> biennales de l'innovation céréalière*.

Labreuche J., Vuillemin F., Métais P., Dubois S., Gautellier Vizios L., Piraux F. (2022) Alternatives au glyphosate : des leviers aux efficacités variables. *Phloème – 3<sup>ème</sup> biennales de l'innovation céréalière*.

Lambert Q. (2023) Sol ressuyé et réchauffé pour une implantation réussie du pois chiche. Article *Terres Inovia*. <https://www.terresinovia.fr/-/pois-chiche-sol-ressuye-et-rechauffe-pour-une-implantation-reussie>

Lançon J., Reau R., Cariolle M., Munier-Jolain N., Omon B., Petit M.S., Viaux P., Wery J. (2008) Élaboration à dire d'experts de systèmes de culture innovants. *Systèmes de culture innovants et durables. Educagri éditions*, 91-107.

Lichtfouse E., Navarette M., Debaeke P., Souchère V., Alberola C., Ménassieu J. (2009) Agronomy for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 1-6.

Liebmann M., Gallandt E.R. (1997) Ecological management of crop–weed interactions. *In : Ecology in Agriculture*, 291-343.

Lucas V., de Tourdonnet S., Barbier J.M., Cittadini R., Gasselin P. (2018) Le glyphosate en agriculture de conservation : Un cas illustratif de la dépendance de l'agriculture française aux pesticides. *Communication pour les 12<sup>è</sup> Journées de Recherche en Sciences Sociales INRA-SFER-CIRAD*, 13-14-déc, Oniris Nantes, 30 p.

Mahé I., Angevin F., Chauvel B. Peut-on mesurer les conséquences du retrait d'une molécule herbicide pivot en s'appuyant sur les expériences passées ? *Innovations Agronomiques*, 2020, 81, 137-150.

Meissle, M., Mouron, P., Musa, T., Bigler, F., Pons, X., Vasileiadis, V.P., Otto, S., Antichi, D., Kiss, J., Pálinkás, Z., Dorner, Z., Weide, R.V.D., Groten, J., Czembor, E., Adamczyk, J., Thibord, J.-B., Melander, B., Nielsen, G.C., Poulsen, R.T., Zimmermann, O., Verschwele, A., Oldenburg, E. (2010) Pests, pesticide use and alternative options in European maize production : current status and future prospects. *Journal of Applied Entomology*. 134, 357–375.

Mesnager R., Antoniou M.N. (2018) Ignoring adjuvant toxicities falsifies the safety profile of commercial pesticides. *Frontiers in public health*, 5:361.

Mesnager R., Defarge N., Spiroux de Vendômois J., Séralini G.E. (2014) Major pesticides are more toxic to human cells than their declared active principles. *BioMed Research International*, 2014, 179691.

Meynard J.M., Dedieu B., Bram Bos A.P. (2012) Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In : *Farming Systems Research into the 21<sup>st</sup> Century : the new dynamic*. 405-429.

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire. (2019) Qu'est-ce que le glyphosate ? <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-glyphosate>

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire. (2022) Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFT) <https://agriculture.gouv.fr/indicateur-de-frequence-de-traitements-phytosanitaires-ift>

Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. (2022) Publication des données provisoires des ventes de produits phytopharmaceutiques en 2021. <https://www.ecologie.gouv.fr/publication-des-donnees-provisoires-des-ventes-produits-phytopharmaceutiques>

Mollier P. (2013) À l'origine de l'agriculture de conservation, les problèmes d'érosion. *INRAE*.

Murphy S.D., Clements D.R., Belaousoff S., Kevan P.G., Swanton C.J. (2006) Promotion of weed species diversity and reduction of weed seedbanks with conservation tillage and crop rotation. *Weed Science*, 54, 69-77.

Office Français de la Biodiversité (2021) Utilisation des pesticides : les règles à respecter par les particuliers. <https://www.ofb.gouv.fr/actualites/utilisation-des-pesticides-les-regles-respecter-par-les-particuliers-hdf>

Peigné J. (2023) Maîtriser les adventices sans labour et sans glyphosate. *Phytoma*, 761.

Peigné J., Vincent-Caboud L., Celette F., Lhuillery T., Vian J.F. (2022) La maîtrise des adventices sans herbicide : intérêt du semis direct de soja et maïs sous couvert roulé. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 12, 1, 92-108.

Pelosi C., Bertrand C., Bretagnolle V., Coeurdassier M., Delhomme., Deschamps M., Gaba S., Millet M., Néliu S., Fritsch C. (2022) Glyphosate, AMPA and glufosinate in soils and earthworms in a French arable landscape. *Chemosphere*, 301, 134672.

Perriot B., Gautellier Vizios L. (2022) Sous quelles conditions peut-on encore avoir recours au glyphosate ? *Article Arvalis* <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/sous-quelles-conditions-peut-encore-avoir-recours-au-glyphosate>

Piel S., Grandcoin A., Baurès E. (2019) L'acide aminométhylphosphonique (AMPA) dans les eaux naturelles et les filières de traitement : origines, comportement et devenir. *Techniques Sciences Méthodes*, 4, 114.

Piola L., Fuchs J., Oneto M.L., Basack S., Kesten E., Casabé N. (2012) Comparative toxicity of two glyphosate-based formulations to *Eisenia andrei* under laboratory conditions. *Chemosphere*, 91, 545-551.

Pretty J. (2020) New opportunities for the redesign of agricultural and food systems. *Agriculture and Human Values*, 37, 629-630.

Pretty J., Benton T.G., Bharucha Z.P., Dicks L.V., Flora C.B., Charles H., Godfray J., Goulson D., Hartley S., Lampkin N., Morris C., Pierzynski G., Vara Prasad P.V., Reganold J., Rockström J., Smith P., Thorne P., Wratten S. (2018) Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1, 441-446.

Reboud X., Blanck M., Aubertot J.N., Jeuffroy M.H., Munier-Jolain N., Thiollot-Scholtus M. (2017) Usages et alternatives au glyphosate dans l'agriculture française. *Rapport Inra à la saisine Ref TR507024*, 85 p.

Reicosky D.C., Saxton K.E. (2007) The benefits of no-tillage. *No-tillage seeding in conservation agriculture*.

Rodriguez A., Bonin L., Buridant C., Duroueix F., Duval R., Gautellier-Vizios L., Labreuche J., Perriot B., Vuillemin F. (2019) Retrait du glyphosate : analyse comparative de faisabilité et d'efficacité des pratiques agronomiques de remplacement. *Végéphyt – 24<sup>ème</sup> conférence du COLUMA : Journée internationale sur la lutte contre les mauvaises herbes*.

Ryan M.R., Caldwell B.A., Crowley K., Liebert J.A., Menalled U., Pelzer C.J, Pickard L., Wayman S. (2021) Organic No-Till Planted Soybean Production. *Sustainable Cropping Systems Lab. Cornell University, Ithaca, NY.*

Ryan M.R., Smith R.G., Mortensen D.A., Teasdale J.R., Curran W.S., Seidel R., Shumway D.L. (2009) Weed-crop competition relationships differ between organic and conventional cropping systems. *Weed research*, 49, 572-580.

Salembier C., Segrestin B., Sinoir N., Templier J., Weil B., Meynard J.M. (2020) Design of equipment for agroecology : coupled innovation processes led by farmer-designers. *Agricultural Systems*, 183, 102856.

Sikorski L., Baciak M., Bes A., Adomas B. (2019) The effects of glyphosate-based herbicide formulations on *Lemna minor*, a non-target species. *Aquatic Toxicology*, 209, 70-80.

Smith R.G., Mortensen D.A., Ryan M. (2010) A new hypothesis for the functional role of diversity in mediating resource pools and weed-crop competition in agroecosystems. *Weed Research*, 50, 37-48.

Stoate C., Boatman N.D., Borralho R.J., Rio Carvalho C., de Snoo G.R., Eden P. (2001) Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of Environmental Management*, 63, 337-365.

Sun R., Li W., Dong W., Tian Y., Hu C., Liu B. (2018) Tillage changes vertical distribution of soil bacterial and fungal communities. *Frontiers in Microbiology*, 9:699.

Thomas F. (2006) Maïs en TCS et SD, des contraintes mais beaucoup d'atouts. *Techniques Culturelles Simplifiées*, 37.

Thomas F. (2007) Implantation : Fermer correctement le sillon. *Techniques Culturelles Simplifiées*, 42, 6-10.

Tresnakova N., Stara A., Velisek J. (2021) Effects of glyphosate and its metabolite AMPA on aquatic organisms. *Applied Sciences*, 11, 9004.

USDA Economic Research Service (2020) Genetically engineered crops in the US, 1996-2020. <https://www.ers.usda.gov/data-products/chart-gallery/gallery/chart-detail/?chartId=99424>

Yasarer L.M.W., Taylor J.M., Rigby J.R., Locke M.A. (2020) Trends in land use, irrigation, and streamflow alteration in the Mississippi river alluvial plain. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 66.

Zanin G., Otto S., Riello L., Borin M. (1997) Ecological interpretation of weed flora dynamics under different tillage systems. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 66, 177-188.

## Annexes

Annexe 1 : Liste des participants à l'atelier de co-conception du 27 mars.

Les personnes en italique étaient dédiées à l'animation. À cette liste s'ajoutent 3 stagiaires de fin d'études et une alternante.

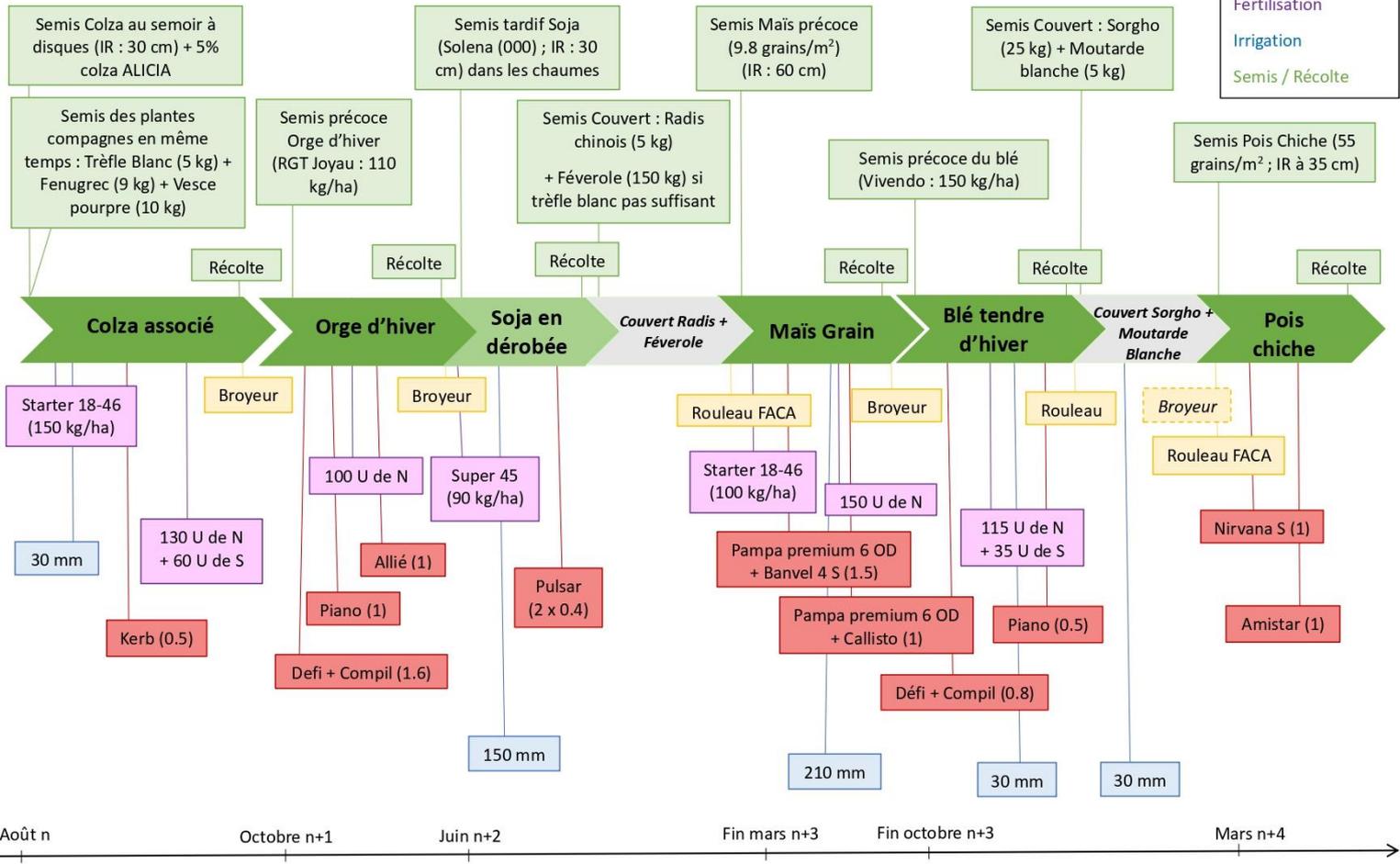
<b>Groupe 1 : Système 0 travail du sol avec maintien des IFTH et –50% sur les IFTHH</b>		<b>Groupe 2 : Système travail du sol réduit autorisé et –50% d'IFT par rapport au système de référence</b>	
Jean Dayde	Enseignant-chercheur et Directeur de la recherche (Purpan)	Élise Audouin	Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne
Diego Diaz-de-Astarloa	Enseignant-chercheur en agronomie (Purpan)	Antoine Bedel	RAGT
Manon Libert	RAGT	Mickaël Cazeneuve	Technicien Campus de Lamothe
Christian Marre	Agriculteur	Nicolas Cestrières	Agriculteur
Hélène Martin	Technicienne Campus de Lamothe	Flore Delsarte	Pioneer
Fanny Vuillemin	Terres Inovia	Mélanie Lobietti	Chambre Régionale d'Agriculture Occitanie
Gervais Wallois	Chef de l'exploitation du Campus de Lamothe	Marie-Hélène Robin	Enseignante-chercheuse en agronomie (Purpan)
<i>Simon Giuliano</i>	<i>Enseignant-chercheur en agronomie (Purpan)</i>	Alain Rodriguez	ACTA les instituts techniques agricoles
		<i>Valentin Deremetz</i>	<i>Ingénieur de recherche en agronomie (Purpan)</i>
		<i>Edwige Hermouet</i>	<i>Stagiaire de fin d'études</i>

Annexe 2 :

**PROTOTYPE OTS ALIAGE : Système 0 travail du sol avec maintien des IFT<sub>Herbicide</sub> et -50% sur les IFT<sub>Hors Herbicide</sub>**

Produits phyto (IFT)  
 Action mécanique  
 Fertilisation  
 Irrigation  
 Semis / Récolte

Les actions encadrées en pointillées correspondent aux actions réalisées uniquement si besoin

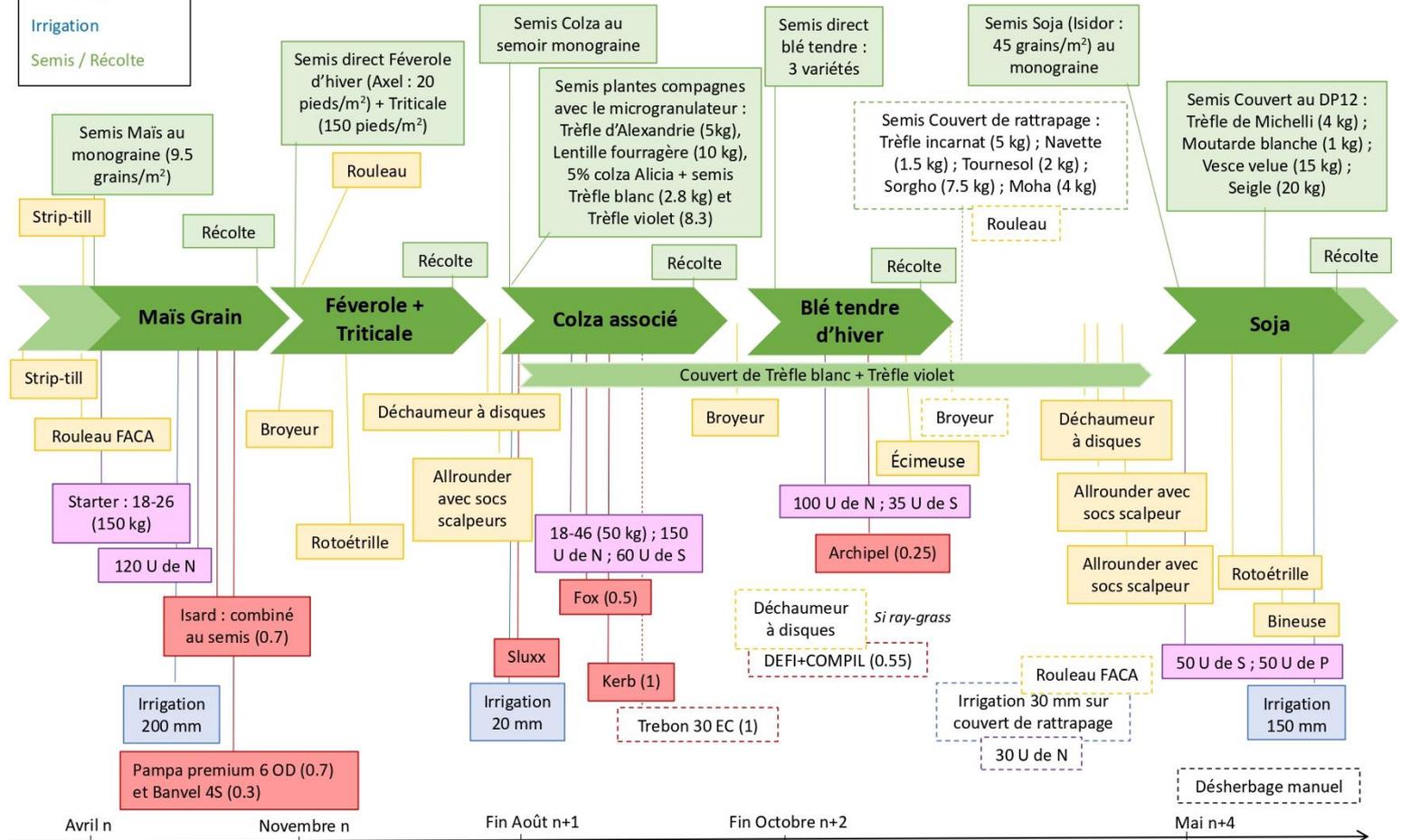


Annexe 3 :

**PROTOTYPE TS ALIAGE : Système travail du sol réduit autorisé et -50% d'IFT**

Les actions encadrées en pointillées correspondent aux actions réalisées uniquement si besoin

- Produits phyto (IFT)
- Action mécanique
- Fertilisation
- Irrigation
- Semis / Récolte



## **Abstract**

Questions about the renewal of glyphosate gather the issues about the use of herbicides. Some situations are still considered to be deadlock if glyphosate is banned, particularly in conservation agriculture systems. The local maize-growing context faces up these issues. In these circumstances, the approach of designing and evaluate cropping systems is applied to test innovative systems. No-till maize monoculture systems already implemented are evaluated *ex post*. In addition, systems co-designed during a workshop and answering the challenges of going without glyphosate with reduced tillage are evaluated *ex ante*. The evaluations were carried out using a multi-criteria approach, considering agronomic, environmental, and socio-economic indicators. Although they significantly reduce fuel costs (-50 %) and working time (-3.5 hours/ha), no-till systems result in a loss of profitability (-53 % for the best system) compared with conventional maize monoculture. Weed biomass is not handled, despite the dependence of these systems on herbicides. Herbicide TFIs are indeed not reduced. In this context of the potential suppression of glyphosate, direct-seeding maize monoculture systems are showing their limitations in terms of weed control and intercropping management. The co-designed prototypes include maize in a rotation. In theory, they show high-performance, whether in terms of TFI (-25 to -77 %), operating and mechanisation costs (-30 to -45 %), working time (around -60 %) or semi-net margin (around +40 %). The implementation of the most promising prototype on experimental plots will enable to complete the results of the *ex ante* evaluation, in particular with agronomic indicators : yield and weed biomass. The design-evaluation of cropping systems must therefore be kept up by continuing to involve all the stakeholders concerned, as was the case during the co-design workshop, to provide the best answer to the many challenges facing agriculture today.

## **Résumé**

Les questionnements sur le renouvellement du glyphosate cristallisent les enjeux autour de l'utilisation des herbicides. Des situations restent à ce jour qualifiées d'impasses techniques en cas d'interdiction du glyphosate et notamment les systèmes en agriculture de conservation des sols. Le contexte maïsicole local est confronté à ces problématiques. Dans ce cadre, la démarche de conception-évaluation de systèmes de culture est appliquée afin de tester des systèmes innovants. Des systèmes de monoculture de maïs en semis direct déjà en place ont ainsi été évalués *ex post*. De plus, des systèmes co-conçus lors d'un atelier et répondant aux enjeux de sortie du glyphosate en travail du sol réduit ont été évalués *ex ante*. Les évaluations ont été faites de manière multicritère en prenant en compte des indicateurs à la fois agronomiques, environnementaux mais aussi socio-économiques. Bien qu'ils permettent de diminuer significativement les charges de carburant (-50 %) et le temps de travail (environ -3.5 h/ha), les systèmes en semis direct occasionnent des pertes de rentabilité (-53 % pour le meilleur système) par rapport à une monoculture de maïs conventionnelle. La biomasse d'adventices n'est pas maîtrisée et ce malgré la dépendance de ces systèmes aux herbicides. Les IFT Herbicide ne sont en effet pas diminués. Dans ce contexte d'éventuelle suppression du glyphosate, les systèmes de monoculture de maïs en semis direct montrent leurs limites concernant la maîtrise des adventices et la gestion des couverts d'interculture. Les prototypes co-conçus incluent ainsi le maïs dans une rotation. Ils sont en théorie plus performants que ce soit en termes d'IFT (-25 à -77 %), de charges opérationnelles ou de mécanisation (-30 à -45 %), de temps de travail (environ -60 %) ou de marge semi-nette (environ +40 %). La mise en place du prototype le plus prometteur sur les parcelles expérimentales permettra de compléter les résultats de l'évaluation *ex ante* notamment avec les indicateurs agronomiques : rendement et biomasse adventices. La démarche de conception-évaluation doit ainsi être poursuivie en continuant d'intégrer l'ensemble des acteurs concernés, comme ça a pu être le cas lors de l'atelier de co-conception, afin de répondre au mieux aux multiples défis de l'agriculture aujourd'hui.