

VÉGÉPHYL – 25^{ème} CONFÉRENCE DU COLUMA
JOURNÉES INTERNATIONALES SUR LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES
ORLÉANS – 5, 6 et 7 DÉCEMBRE 2023

ÉTUDE D'ITINÉRAIRES TECHNIQUES ALTERNATIFS A L'USAGE DE GLYPHOSATE EN GRANDES CULTURES

J. LABREUCHE ⁽¹⁾, F. VUILLEMIN ⁽²⁾, A. RODRIGUEZ ⁽³⁾, B. PERRIOT ⁽¹⁾, R. DUVAL ⁽⁴⁾,
L. GAUTELLIER VIZIOZ ⁽¹⁾, F. PIRAUX ⁽¹⁾

⁽¹⁾ ARVALIS, Station expérimentale 91720 BOIGNEVILLE j.labreuche@arvalis.fr

⁽²⁾ Terres Inovia, 6 chemin de la côte vieille 31 450 BAZIEGE

⁽³⁾ ACTA, 6 chemin de la côte vieille 31 450 BAZIEGE

⁽⁴⁾ Institut Technique de la Betterave, 45 Rue de Naples 75008 PARIS

RÉSUMÉ

Les techniques alternatives au glyphosate sont assez nombreuses en grandes cultures. Elles reposent sur des leviers préventifs (gestion du désherbage dans la rotation...) ou curatifs de gestion de l'interculture. Les partenaires du projet AGATE (ACTA, Arvalis, Chambres d'agriculture de l'Aude et de l'Ariège, ITB, Terres Inovia) ont évalué ces différentes alternatives principalement dans des expérimentations au champ. La plupart reposait sur le travail du sol qui reste le levier de substitution le plus opérationnel à ce jour. L'efficacité du travail superficiel est très variable selon la flore, son stade et les conditions d'humidité du sol et de l'air. Même s'ils augmentent le recours au travail du sol, les itinéraires alternatifs sans glyphosate peuvent montrer leurs limites, en particulier s'ils sont conduits sans labour. Ils peuvent nécessiter de combiner d'autres leviers (modifier les dates d'intervention ou de semis, changer de précédent cultural...). Des impasses subsistent à ce jour, en particulier en agriculture de conservation des sols.

Mots-clés : glyphosate, alternatives, travail du sol, adventices

ABSTRACT

Alternative techniques to the use of glyphosate are quite numerous in arable crops. They rely on preventive (weed management in the crop rotation) or curative means. Partners of the AGATE project (ACTA, Arvalis, Chambers of agriculture of Aude and Ariège, ITB, Terres Inovia) assessed these different alternatives, mostly in field trials. Most of them relies on soil tillage that is the easiest one to put in practice. The efficacy of superficial tillage varies much depending on the species of weeds, their growth stage, the soil moisture and the ability of climate to desiccate weeds. Even if alternative itineraries include a greater number of soil tillage operations, they have some limits on weed control, especially with minimum tillage techniques. They need to combine other levers such as changing periods of soil tillage or sowing, changing the sequence of crops... We still lack of solutions, particularly in conservation agriculture.

Keywords: glyphosate, alternatives, soil tillage, weeds

Contexte

Le glyphosate est un herbicide foliaire systémique non sélectif à large spectre (Rodriguez et al., 2019). Son efficacité sur les vivaces et les graminées annuelles en situations non labourées a contribué à développer son utilisation en grandes cultures. Il a été appliqué sur 18.9% des surfaces de grandes cultures en 2016/2017 (Carpentier et al., 2020). L'enquête 2017 du SSP (Service de la statistique et de la prospective du ministère de l'Agriculture) ainsi qu'une seconde enquête réalisée durant l'été 2019 par les instituts techniques agricoles (ACTA, Arvalis, FNAMS, ITB et Terres Inovia) ont mis en évidence que son usage visait avant tout la destruction d'espèces annuelles pendant la période d'interculture (Bonin et al., 2021). Les couverts représentaient, quant à eux, 17 % de cet usage d'après l'enquête du SSP en 2017.

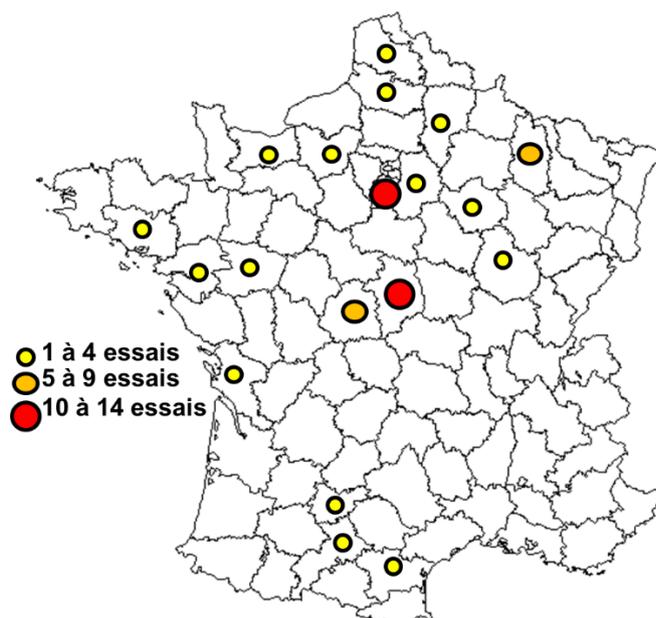
L'utilisation du glyphosate est remise en cause depuis l'annonce fin 2017 du gouvernement français de s'affranchir de cette substance active (Bisch et al., 2019). Porté par l'Acta et rassemblant Arvalis, Terres Inovia, l'Institut Technique de la Betterave (ITB) et les Chambres d'agriculture de l'Aude et de

l'Ariège, le projet AGATE GC a évalué les différentes alternatives à l'usage du glyphosate, en combinant des expérimentations et l'expertise des partenaires. Des essais ciblés sur les périodes d'interculture ont été mis en place. Différents leviers ont été évalués mais c'est surtout le travail du sol qui a été utilisé dans les expérimentations. Des travaux antérieurs ou réalisés en même temps que le début du projet AGATE ont montré les limites notamment sur graminées des techniques alternatives sans travail du sol, telles le roulage (Labreuche et Bodilis, 2010) ou le désherbage électrique (Brun, 2020). Le travail du sol semble être l'alternative la plus facilement mobilisable, même s'il présente des limites tant au niveau des efficacités sur la flore à détruire que de considérations agronomiques ou socio-économiques. Des ateliers de conception de systèmes de culture sans glyphosate et de partage des expériences sur les réussites et les échecs ont aussi été organisés et ont mis en lumière les besoins d'accompagnement des agriculteurs.

Matériel et méthodes

Des expérimentations ont testé des itinéraires techniques visant à se passer de glyphosate pendant l'interculture tout en semant sur un sol exempt d'adventices levées. Certaines ont été réalisées par Arvalis, l'ITB et Terres Inovia, dans le cadre du projet AGATE GC. D'autres ont été mises en place par Arvalis et Terres Inovia avant le début de ce projet. Les tous premiers essais datent de 2009 ou 2010. La plupart a été réalisée de 2017/2018 à 2020/2021. Nous avons également intégré les essais du Réseau d'Excellence Expérimentale R2E (coopératives Agrial, Dijon céréales, Terrena, Valépi et Vivescia ; Nord négoce ; Arvalis sur le site du Magneraud) pour la campagne 2020/2021 sur cette thématique. Les itinéraires techniques des 64 essais constituant la base de données (figure 1) ont été mis en œuvre dans différentes situations (types de sol, types d'interculture, matériel...). Les suivis concernent des cultures d'automne mais plus fréquemment des cultures de printemps. La plupart des itinéraires n'intégraient pas de labour mais des déchaumages profonds à très superficiels. La flore a été décrite à l'aide de la méthode Barralis (Barralis, 1976) ou de comptages sur des quadrats (densité pour chaque espèce avec notation des stades phénologiques). Elle a en général été observée à trois périodes : au semis de la culture et dans la culture avant ou après désherbage. Dans de nombreux essais, elle a aussi fait l'objet de suivis rapprochés à des dates encadrant des interventions mécaniques pendant la période d'interculture, ce qui a permis de calculer l'efficacité sur la flore d'un ou deux passages rapprochés dans le temps.

Figure 1 : Localisation des 64 essais testant des alternatives au glyphosate.
Location of the 64 field trials testing alternatives to glyphosate.



Tous ces suivis ont été analysés via deux variables : l'efficacité de destruction d'adventices à la suite d'une opération de travail du sol (voire deux ou trois réalisées sur un pas de temps rapproché) et l'impact de l'itinéraire technique mis en œuvre pendant l'interculture sur la flore dans la culture suivante.

- **Efficacité de la destruction d'adventices suite à une opération de travail du sol superficiel**

Nous avons effectué 465 observations en croisant une espèce d'adventice à un stade donné pour un mode de destruction à une date donnée. L'analyse a été réalisée espèce par espèce. Nous avons pris soin de bien distinguer les adventices présentes avant le passage d'outil et qui n'ont pas été détruites de celles qui ont levé après ce passage, de sorte à bien distinguer la destruction des adventices de l'effet « faux-semis ». Seules ont été prises en compte les destructions par du travail du sol superficiel (<25 cm et le plus souvent <15 cm), réalisé sur 100% de la surface du sol et sans retournement du sol (labour exclu). Nous n'avons pris en compte que les espèces annuelles (adventices, repousses de culture et couverts végétaux). Nos suivis de courte durée ne permettaient pas de conclure pour les vivaces ou bisannuelles.

Les sols non labourés représentent 412 données. Seules 11 observations correspondent à des reprises de labour (premier travail du sol après le labour qui émiette et nivelle le sol) ; elles ont été exclues faute de données suffisamment nombreuses. En revanche, 53 « préparations de sol sur reprise de labour » ont été réalisées sur un labour déjà repris une fois (donc bien renivelé) et ont été gardées dans l'analyse. Sur l'ensemble des données, les principaux matériels utilisés sont : déchaumeurs à disques ≤ 8 cm ; outils à dents ≤ 8 cm ou entre 9 et 15 cm ; outils animés (herse rotative principalement) ≤ 8 cm ; combinaison de plusieurs passages d'outils. Une pré-analyse des données a montré une absence d'effet significatif de la profondeur et un effet significatif du type d'outil. Nous avons alors regroupé les interventions en 3 catégories, quelles que soient les profondeurs de travail, selon les premiers résultats : les outils animés plus agressifs sur les adventices, les outils non animés, les combinaisons de plusieurs passages trop disparates pour être regroupées en classes plus fines.

La base de données inclut 83 notations de couverts. Elles ont été ajoutées aux 185 notations d'adventices dicotylédones et 197 notations d'adventices graminées. Les stades ont été pris en compte: stade A = plantule (≤ 3 feuilles) ; stade B = plante jeune (> 3 feuilles ou rosette pour les dicotylédones ; début tallage pour les graminées) ; stade C = plante adulte (ramification pour les dicots, plein tallage à montaison pour les graminées) ; stade D = floraison (boutons floraux, floraison, épiaison) ; stade E = grenaison. Les familles et stades ont été regroupés pour former des combinaisons « Famille_stade ».

La taille des mottes après l'intervention mécanique a été évaluée visuellement a posteriori selon une échelle de 1 à 4. L'humidité du sol sur 0-10 cm le jour du passage de l'outil a été simulée à l'aide du modèle CHN (Soenen et al., 2019) et a été exprimée en % de l'humidité à la capacité au champ (Hcc). Selon les situations, elle a varié de 47 à 109% de la Hcc, avec une moyenne de 84%. Un indicateur climatique a aussi été calculé : bilan P (pluie) – ETP (évapotranspiration potentielle) sur 5 jours, le jour du passage de l'outil et les 4 jours suivants. Cet indicateur a varié de -31 à +27 mm. En cas de multiples passages d'outils, nous avons retenu la valeur la plus favorable à la destruction des adventices : note de taille des mottes la plus élevée, humidité et indicateur climatique les plus faibles.

Une analyse globale a été réalisée en cherchant à expliquer la variable « % de destruction des adventices » transformée : $\ln(100 - \% \text{ destruction} + 1)$. Elle a englobé toutes les variables utilisables ainsi que leurs interactions dans un modèle mixte avec les essais en effets aléatoires. Les effets fixes non significatifs ont été progressivement éliminés, pour ne conserver finalement que les Famille_stade, l'indicateur climatique, l'humidité du sol, l'outil de destruction (non animé, animé ou combinaisons) et l'interaction entre l'indicateur climatique et les Famille_stade.

- **Impact de l'itinéraire technique mis en œuvre pendant l'interculture sur la flore adventice dans la culture suivante**

204 itinéraires techniques ont été mis en œuvre dans différentes situations (types de sol, types de culture). La plupart des essais ont comparé différents itinéraires. Ces derniers ont été évalués au niveau de la flore au semis de la culture et dans la culture suivante avant ou après désherbage.

Chaque itinéraire est un enchaînement de plusieurs interventions. Ces dernières ont été décidées en fonction des objectifs assignés à chacun (par exemple la profondeur de travail du sol visée, l'absence ou non de glyphosate), du contexte pédoclimatique, du type d'interculture et de la flore adventice. L'analyse de leur impact sur la flore est donc assez difficile puisqu'il y a de nombreuses interactions. Les interventions se sont en effet adaptées à la flore adventice présente. Par exemple, on peut obtenir au semis plus d'adventices dans une parcelle sale malgré de nombreuses interventions que dans une autre parcelle propre avec peu de passages. Nous ne disposons d'ailleurs pas d'indicateurs pour caractériser la flore de la parcelle comme son stock semencier. Le nombre de passages d'outils de travail du sol s'est adapté à la flore adventice à détruire, à la présence ou pas de glyphosate avant semis ainsi qu'aux possibilités techniques de réaliser ou pas les opérations souhaitées. L'absence d'herbicide pendant l'interculture est compensée par une augmentation des moyens mécaniques.

Nous avons tenté d'analyser les itinéraires en les caractérisant selon différents indicateurs. Le type de culture a été réparti entre colza, blé d'hiver, culture de printemps semée du 15 février au 31 mars, culture de printemps semée du 1^{er} au 19 avril ; culture de printemps semée du 20 avril au 25 mai. Les stratégies de travail du sol ont été séparées en fonction du retournement du sol, de la profondeur maximale de travail du sol pendant l'itinéraire et de l'absence ou présence de glyphosate (labour, déchaumage profond 12 et 25 cm, déchaumage superficiel entre 6 et 11 cm, déchaumage très superficiel à moins de 6 cm, labour avec glyphosate, déchaumage quelle que soit sa profondeur avec glyphosate, semis direct avec glyphosate). A noter que les itinéraires sans glyphosate et sans travail du sol ne sont pas représentés car non opérationnels à ce jour en présence d'adventices. Un indicateur climatique sur 25 jours a été calculé : Pluies – ETP cumulé de 20 jours avant le semis de la culture à 4 jours après. Ce bilan reflète le caractère plus ou moins séchant de la période précédant le semis et jusqu'à 4 jours après.

La flore présente au moment du semis de la culture a souvent été évaluée après le semis en veillant à bien distinguer les nouvelles levées faisant suite au semis de la culture et la flore plus développée qui n'a pas été détruite par les opérations culturales réalisées pendant l'interculture ou au semis. C'est cette seconde flore qui nous intéresse dans le cadre de l'évaluation de la destruction de la flore par les outils de travail du sol. La flore présente dans la culture suivante a aussi été évaluée. Selon les essais, il y avait eu ou pas au préalable des opérations de désherbage chimique ou mécanique.

Un modèle linéaire mixte a été testé en prenant le logarithme du nombre d'adventices au semis +1 comme variable à expliquer par les variables qui étaient significatives seules : stratégie de travail du sol, type de culture et indicateur climatique sur 25 jours, avec l'essai comme effet fixe.

Le modèle linéaire mixte qui a été retenu pour expliquer le logarithme du nombre d'adventices dans la culture +1 intégrait les variables stratégie de travail du sol, type de culture et indicateur climatique sur 25 jours, avec l'essai comme effet fixe.

Principaux résultats et interprétation

- **Efficacité de la destruction d'adventices suite à une opération de travail du sol**

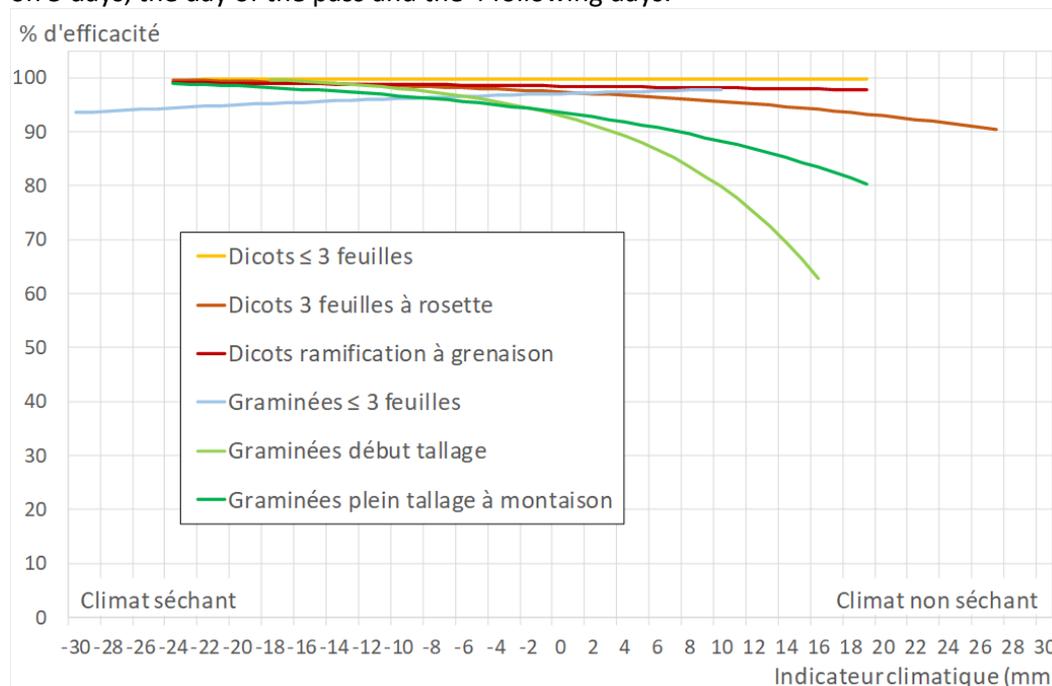
Le modèle linéaire mixte retenu inclut comme variables explicatives le type d'outil qui est hautement significatif ainsi que l'indicateur climatique, l'humidité du sol, les Famille_stade et l'interaction indicateur climatique * Famille_stade qui sont très hautement significatifs. 30% de la variance sont expliqués par les effets fixes du modèle. En ajoutant les effets aléatoires (essais), 46% de la variance sont expliqués. Le gel et la taille des mottes ne ressortaient pas significativement dans le modèle et n'amélioreraient pas la variance expliquée.

Les dicotylédones se montrent pour la plupart très sensibles à la destruction mécanique par un travail superficiel du sol (figure 2). C'est particulièrement vrai pour les plantules au stade A (≤ 3 feuilles) ou celles qui ont émis ou sont en train d'émettre leur appareil reproducteur (stades CDE : élongation,

floraison, grenaison). Pour les dicots au stade B, l'efficacité de destruction se dégrade légèrement sous des climats peu séchants et se montre un peu plus variable entre espèces. Par exemple, les laitersons rudes, séneçons communs, mercuriales annuelles et renouées se sont montrés très sensibles, au contraire des gaillets grateron, géraniums et trèfles incarnats qui sont plus difficiles à détruire (Labreuche et al., 2022).

Figure 2 : Impact de l'indicateur climatique sur la destruction des adventices, selon leurs familles et stades. Données simulées par le modèle mixte pour une humidité de 70% de la Hcc et un outil de travail du sol non animé. L'indicateur climatique est un bilan P (pluie) – ETP (évapotranspiration potentielle) sur 5 jours, le jour du passage de l'outil et les 4 jours suivants.

Impact of climate on the mechanical destruction of weeds according to their family and growth stage. Data simulated by the model for a soil moisture of 70% of the water-holding capacity and a non-pto driven soil tillage machinery. The climate indicator is a balance Rain – Evapotranspiration on 5 days, the day of the pass and the 4 following days.



Les graminées au stade jeune plantule (stade A ≤ 3 feuilles) montrent une bonne sensibilité à la destruction, avec des niveaux oscillants entre 90 et 100% d'efficacité selon l'indicateur climatique, l'humidité du sol et le type d'outil. Les graminées au stade B (début tallage) ou C (plein tallage-montaison) s'avèrent nettement plus difficiles à détruire, notamment avec des indicateurs climatiques positifs. Ces conditions peu séchantes sont favorables à leur repiquage, leur système racinaire fasciculé se séparant difficilement de la terre qui l'entoure. L'humidité du sol a aussi un impact sur la destruction des graminées tallées en conditions non séchantes. Les sols secs (50% de la Hcc) permettent d'obtenir de meilleures destructions que des sols friables (70% de la Hcc), alors que les sols semi-plastiques (90% de la Hcc) se montrent les moins favorables. Il est en effet plus facile de dessécher des plantes sur un sol sec qu'un sol humide. Le travail du sol produit aussi moins de mottes en sol friable qu'en sol semi-plastique, ce qui est plus favorable à la séparation de la terre et des racines des plantes. La meilleure efficacité de destruction des outils animés, comparés aux outils non animés, trouve aussi la même explication. On peut également signaler que le fait d'approfondir le travail du sol (9-15 cm au lieu de moins de 9 cm) n'a pas amélioré l'efficacité de destruction des adventices, que ce soit avec des outils à dents ou des outils animés. Cela pourrait s'expliquer par le fait que si toutes les adventices sont bien déracinées dans les deux cas de figure, travailler superficiellement le sol crée moins de mottes et laisse plus d'adventices en surface en conditions favorables au dessèchement. A contrario, un travail plus

profond en enfouira plus en profondeur pour provoquer leur disparition mais sans égaler le niveau d'enfouissement procuré par une charrue équipée de rasettes.

A noter que nous n'avons pas observé de différences sensibles de comportement entre repousses de blé, vulpins et ray-grass face à la destruction par un travail du sol superficiel.

- **Impact des itinéraires techniques mis en œuvre pendant l'interculture sur la flore adventice**

Un modèle linéaire mixte a été testé en prenant le logarithme du nombre d'adventices au semis +1 comme variable à expliquer par les variables stratégie de travail du sol, type de culture et indicateur climatique sur 25 jours, avec l'essai comme effet fixe. La culture n'a pas d'effet significatif (p value de 0.18). L'indicateur climatique sur 25 jours ressort significativement (p value de 0.03). Plus le bilan hydrique est élevé, plus on a tendance à observer des adventices au semis. La stratégie de travail du sol ressort comme très significative (p value de 0.008). Les modalités labourées et sans glyphosate donnent les valeurs les plus faibles sans pour autant qu'elles ne soient nulles. Le travail du sol superficiel sans glyphosate (entre 6 et 11 cm ou inférieur à 6 cm) montre davantage d'adventices au semis. Les autres modalités restent à un niveau intermédiaire (groupe statistique AB). La profondeur de déchaumage ne semble pas avoir d'importance sur la propreté au semis. Le glyphosate n'améliore pas statistiquement le salissement au semis d'après cette synthèse. Il faut rester très prudent avec cette conclusion étant donné les limites de la base de données. Par ailleurs, les stratégies sans glyphosate ont souvent été compensées par un renforcement du nombre d'opérations mécaniques, ce qui a pu améliorer le contrôle de la flore adventice, même si le travail du sol a ses limites.

Le modèle linéaire mixte qui a été retenu pour expliquer le logarithme du nombre d'adventices dans la culture +1 intégrait les variables stratégie de travail du sol, type de culture et indicateur climatique sur 25 jours, avec l'essai comme effet fixe. L'indicateur climatique n'a pas d'effet significatif (p value de 0.35). La culture ressort peu (p value de 0.11). La stratégie de travail du sol ressort comme très significative (p value de 0.001). Il y a des écarts entre modalités, même s'il est difficile de distinguer la plupart des modalités entre elles au niveau statistique. Le travail du sol très superficiel sans glyphosate et le semis direct avec glyphosate ont vu significativement plus d'adventices dans la culture que le labour avec glyphosate. La perturbation du sol avant le semis n'est pas ressortie dans cette analyse. Le type de destruction, mécanique ou chimique, est cependant ressorti d'un réseau plus restreint d'essais réalisés par Terres Inovia en 2019. Il n'a pas eu d'impact sur les dicotylédones mais en a eu sur ray grass, la destruction mécanique semblant avoir stimulé leur levée dans la culture suivante.

Il est intéressant de noter qu'il n'y a pas de relation directe entre le nombre d'adventices au semis et celui observé dans la culture. En tendance, il y a plutôt plus d'adventices dans la culture que lors de son semis. En l'absence de désherbage de la culture (ou avant qu'il n'intervienne), les plantes présentes au semis restent en place dans la culture, jusqu'à leur sénescence, et sont renforcées par les levées ultérieures au semis.

L'analyse statistique de ce réseau d'essais sur les itinéraires techniques reste assez décevante. En effet, il y a de nombreuses interactions entre la flore adventice de la parcelle, le climat, le type d'interculture et les pratiques culturales. Un regroupement d'itinéraires assez proches mais pas tout à fait identiques et réalisés dans des conditions différentes, par exemple selon la profondeur maximale de travail du sol, ne permet pas d'aboutir à des conclusions très marquées. En revanche, l'analyse de chaque situation au cas par cas est très riche d'enseignements. Une synthèse qualitative de la flore obtenue au semis de la culture selon les itinéraires testés permet de dégager les tendances suivantes :

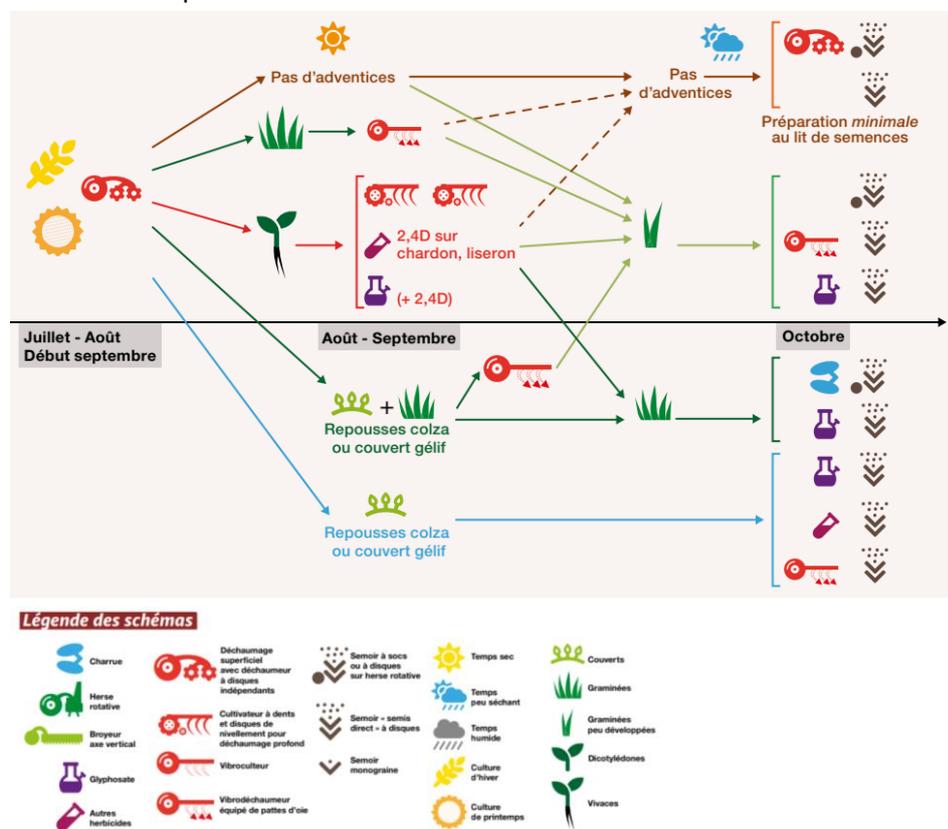
- Les itinéraires où il n'a pas été possible de semer sur un sol exempt d'adventices viables au semis étaient, dans la plupart des cas, conduits sans labour et sans glyphosate. Les cultures de printemps y étaient semées assez précocement, entre février et avril, avec des interventions avant le semis en conditions peu séchantes. La flore comprenait de fortes densités de graminées adventices ou de repousses de céréales.

- La plupart des situations où il a été possible de semer sur un sol exempt d'adventices sans glyphosate incluaient un labour, ou des semis de blés ou de colza, ou des semis tardifs de printemps par temps séchant (en mai ou même avril), ou des semis plus précoces (février à avril) mais bénéficiant de conditions assez séchantes pour la saison et d'une flore peu difficile.

foliaires (stade trop développé), elles risquent de se montrer très concurrentielles envers la culture et de produire des semences, augmentant ainsi le stock semencier pour les années à venir. Les leviers préventifs sont donc très importants dans la plupart des cas pour semer sur un sol « propre ». Le travail du sol, que ce soit le labour ou des façons plus superficielles, constitue le levier le plus efficace si le glyphosate n'est pas utilisé. En effet, les opérations mécaniques sans travail du sol (broyage, roulage) ou le gel présentent une efficacité correcte sur un nombre limité de cibles, parmi les dicotylédones principalement (tableau 1). Le désherbage électrique s'est aussi montré d'une efficacité variable selon les adventices, avec notamment des limites sur graminées en sol humide (Brun, 2020).

Le labour se montre très efficace pour détruire quasiment toutes les annuelles si le sol est correctement retourné. Le labour trouvera ses limites dans des sols très argileux et plastiques (mauvais émiettement et retournement du labour) et surtout en sol caillouteux et superficiels (mauvais retournement du sol, faute de volume de sol suffisant). Les labours réalisés tôt (de l'été à l'entrée d'hiver) peuvent aussi se salir pendant l'hiver et le printemps. Ces adventices doivent alors être gérées avant le semis. Cela est assez facile avec de jeunes plantules dicotylédones et beaucoup plus délicat s'il s'agit de graminées ayant atteint le stade tallage. Le travail du sol superficiel, décrit précédemment, se montre d'une efficacité très variable selon les adventices, leur stade et ses conditions de réalisation. En conditions peu favorables, il faut envisager d'autres solutions préventives (anticiper l'intervention en conditions plus sèches, adapter si possible ses enchaînements de culture...) ou curatives (labour, reporter la destruction au printemps en conditions sèches, herbicide...). L'efficacité aléatoire du travail du sol a été systématiquement évoquée par les agriculteurs dans les ateliers, ainsi que le risque d'endommager la qualité du lit de semences et donc de pénaliser l'implantation de la culture.

Figure 3 : Proposition de combinaison de leviers entre une récolte d'été et une céréale d'hiver. Combination of different alternatives to glyphosate in an intercropping period between a crop harvested in summer and a winter cereal.

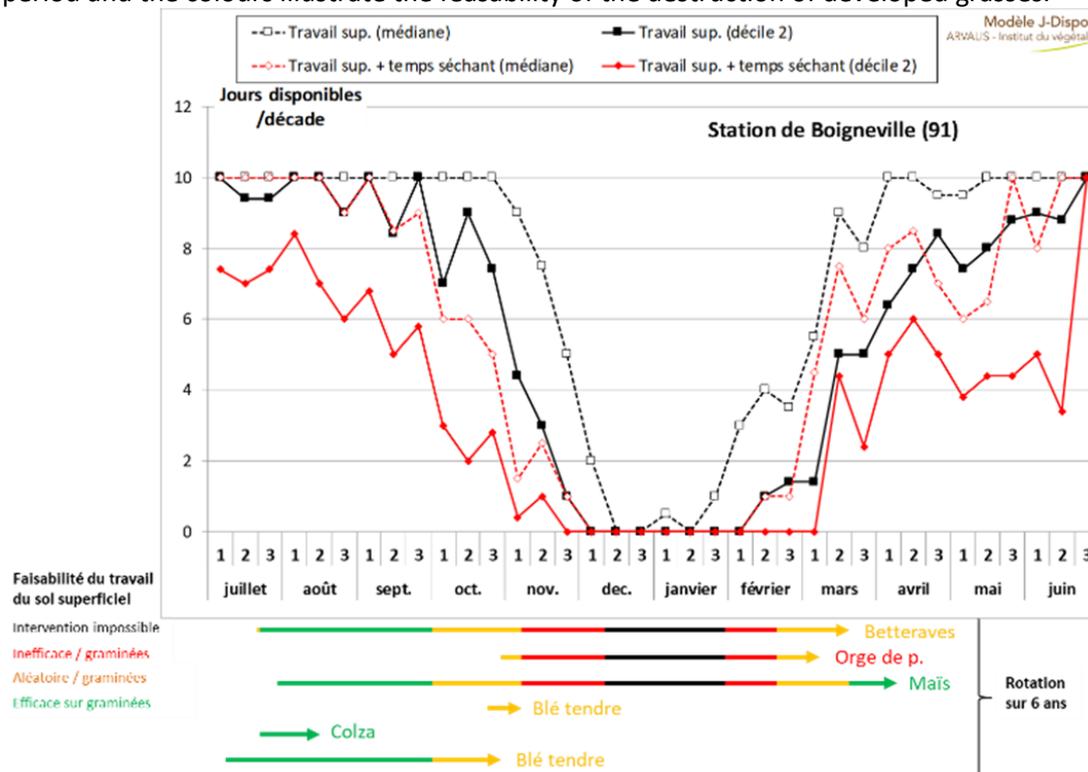


En pratique, il semble nécessaire de combiner les alternatives au glyphosate lors d'une campagne culturale ou à l'échelle de la rotation. Une seule intervention est rarement suffisante. Il faut savoir

combiner des leviers préventifs, d'évitement, d'atténuation et curatifs. Dans bien des cas, plusieurs opérations « curatives » sont nécessaires pour semer sur un sol exempt d'adventices viables. Pour chaque culture de la rotation ou chaque parcelle de l'exploitation, les conditions de mise en œuvre sont différentes (précédent cultural, date de semis, type de sol, climat...). L'efficacité des différents leviers sera différente d'un cas à l'autre et les itinéraires doivent s'adapter en conséquence. Des propositions ont été faites dans le cadre du projet AGATE (Labreuche et al., 2021b). Un exemple est présenté sur la figure 3, entre une récolte d'été et une céréale d'hiver. Plusieurs itinéraires sont proposés selon la flore présente. L'anticipation est essentielle pour prendre en compte le caractère plus ou moins séchant du climat selon la période de l'année. Par exemple, il est important de détruire mécaniquement en fin d'été les graminées développées car l'automne est une période moins favorable à cette destruction.

Figure 4 : Nombre de jours disponibles par décade pour réaliser un travail du sol superficiel sans autre contrainte ou avec des conditions séchantes permettant de détruire des graminées tallées. Simulations sur 18 campagnes de 2002/2003 à 2019/2020 pour un limon argileux profond sur calcaire et la station météo de Boigneville (91). Le schéma présent en bas de la figure illustre pour l'essai A les 6 intercultures de la rotation culturale. Chaque flèche montre la durée de l'interculture (de la récolte du précédent au semis de la culture) et les couleurs illustrent la faisabilité de destruction de graminées tallées.

Number of working days per decade for a superficial tillage and a superficial tillage associated with drying conditions for the destruction of grasses after 3 leaves growth stage. Simulations on 18 campaigns from 2002/2003 to 2019/2020 for a deep clay loam and the weather station of Boigneville (France). A six year crop rotation is illustrated. Each arrow show the intercropping period and the colours illustrate the feasibility of the destruction of developed grasses.



Pour évaluer la faisabilité du travail du sol superficiel en termes de destruction des adventices, les conditions requises pour détruire des graminées tallées ont été intégrées dans le modèle J-Dispo d'Arvalis (Métais et al., 2018). Ce dernier simule l'humidité du sol en fonction des caractéristiques d'un type de sol et de données météorologiques puis applique des règles de décision pour définir si un jour est agronomiquement disponible ou pas pour réaliser une opération culturale donnée. Une analyse

fréquentielle sur une vingtaine d'années est alors réalisée. Différents types d'intervention peuvent faire l'objet de ce type d'analyse : broyage, roulage sur gel, labour, travail du sol superficiel... On peut considérer que ce dernier est à même de détruire les dicotylédones et les jeunes plantules de graminées en un à deux passages selon le type d'adventice ou son stade. Nous avons créé un nouveau test « Travail superficiel + temps séchant », qui requiert, pour détruire des graminées tallées, des jours agronomiquement disponibles pour réaliser un travail du sol superficiel ainsi que des conditions « séchantes » le jour du passage et les jours suivants. Les exigences climatiques ont été modulées selon l'humidité du sol.

A titre d'exemple, la figure 4 illustre le nombre de jours agronomiquement disponibles par décennie pour réaliser un travail du sol superficiel ou un travail du sol superficiel suivi d'un temps séchant. Pour les deux types d'opérations, nous présentons le décile 2 et la médiane des jours disponibles par décennie. Ils illustrent la valeur atteinte respectivement au moins 8 années sur 10 ou au moins 5 années sur 10. La première valeur représente quelque chose d'assez robuste, sans forcément prendre en compte les années extrêmes. La médiane donne une information supplémentaire pour laisser entrevoir des opportunités d'intervention certaines années, lorsque la valeur indiquée par le décile 2 est faible. Sans surprise, on retrouve un effet très marqué des saisons sur le nombre de jours disponibles (figure 4). La période hivernale présente peu de jours disponibles, en particulier si on recherche des conditions séchantes. La période estivale est au contraire très favorable. L'automne et le printemps se situent à un niveau intermédiaire. La figure 4 illustre à titre d'exemple une rotation culturale sur 6 ans sous le graphe des jours disponibles. Ce type d'exercice permet de déterminer les probabilités de pouvoir détruire des graminées tallées par du travail du sol superficiel. Si cela est impossible, on peut envisager d'autres alternatives (anticiper la date de destruction, retarder le semis de la culture, changer de précédent...).

Conclusion/perspectives

Les techniques alternatives au glyphosate sont assez nombreuses en grandes cultures et peuvent être de natures très diverses. Cependant, elles reposent pour l'essentiel sur des interventions mécaniques pendant l'interculture : outils de travail du sol, broyeurs, rouleaux... Elles ont été caractérisées dans le cadre du projet AGATE GC (Labreuche et al., 2021a). Le travail du sol est le levier de substitution le plus facile à mettre en œuvre en l'état actuel des choses. Les principales impasses à la substitution du glyphosate par des techniques alternatives se situent là où le travail du sol est complexe à mettre en œuvre ou contraint par l'humidité du sol (sols lourds ou hydromorphes, sols pierreux et superficiels empêchant le labour, semis précoces de sortie d'hiver en conditions peu séchantes, périodes humides...). Les solutions sans travail du sol (couverts végétaux, rouleaux ou broyeurs) sont d'une efficacité très partielle sur graminées notamment, ce qui rend l'agriculture de conservation des sols (ACS) très dépendante de l'usage de glyphosate (APAD, 2020 ; Carpentier et al., 2020). Un gros travail reste à faire dans ces situations d'impasse pour proposer des solutions, ce qui est au programme du projet AGILE (Ecophyto 2022-2025). Le travail continue également sur les combinaisons de leviers pour construire des systèmes de culture moins dépendants des herbicides, avec le projet COMBHERPIC (Ecophyto, 2023-2025) où l'expertise acquise entre autres dans le projet AGATE sera intégrée dans des DAG (Direct Acyclic Graph) complétés d'un Réseau Bayésien. Ils visent à prédire et évaluer l'effet d'un ou de plusieurs leviers combinés sur la gestion de la flore adventice.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre des projets AGATE GC et J-DISTAS financés par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, avec la contribution financière du compte d'affectation spécial 'Développement agricole et rural' (CASDAR).

Références bibliographiques

- APAD, 2020. Utilisation du glyphosate en Agriculture de Conservation des Sols. Etats des lieux en 2020 et perspectives. APAD. 11 pages.
- BARRALIS, G., 1976 - Méthode d'étude des groupements adventices des cultures annuelles : Application à la Côte-d'Or. V^o Colloque fiil. Ecol. Biol. Mauvaises Herbes, Dijon, 59-68.
- BISCH, P.E., HUBERT, L., PINCONNET, D., 2019. Mission de coordination de la feuille de route relative aux produits phytosanitaires et au plan de sortie du glyphosate. CGAAER, 70 pages.
- 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, 40-44.
- BRUN, D., 2020. Le désherbage électrique : une efficacité dépendant de nombreux facteurs. Perspectives agricoles 476, 58-61.
- CARPENTIER, A., FADHUILE, A., ROIGNANT, M., BLANCK, M., REBOUD, X., JACQUET F., HUYGHE, C., 2020. Alternatives au glyphosate en grandes cultures. Evaluation économique. INRAE, 159 pages.
- DESSIENNE, C., 2019. Gestion de l'interculture dans des rotations de grandes cultures : évaluation multicritère de solutions alternatives à l'utilisation du glyphosate. Mémoire Agro Campus Ouest. 89 pages.
- LABREUCHE, J., BODILIS A.M., 2010. Sensibilité de cultures intermédiaires au gel et à l'utilisation de méthodes de destruction mécanique. 21^{ème} CONFÉRENCE DU COLUMA – 8 ET 9 DÉCEMBRE 2010, Dijon.
- LABREUCHE, J., VUILLEMIN, F., DUBOIS, S., GAUTELLIER VIZIOZ, L., 2021a, Gestion des adventices annuelles : des alternatives aux efficacités variables. Perspectives agricoles 484, 49-54.
- LABREUCHE, J., VUILLEMIN, F., DUVAL, R., DUROUEIX, F., BONIN, L., DESSIENNE, C., 2021b. L'interculture sans glyphosate en pratique : des solutions proposées au cas par cas. Perspectives agricoles 484, 56-61.
- LABREUCHE, J., VUILLEMIN, F., METAIS, P., DUBOIS, S., GAUTELLIER VIZIOZ, L., PIRAUX, F., 2022. Alternatives au glyphosate : des leviers aux efficacités variables. PHLOEME – 3^{ème} Biennales de l'innovation céréalière – 3 et 4 novembre 2022, Paris.
- METAIS, P., BESSAID DUPARC, P., TROCHARD, R., SOENEN, 2018. Estimation of available days for cultivation work: evaluation of J-Dispo tool using CHN dynamic crop model. 21th ISTRO International Conference. September 2018.
- PEIGNE, J., CASAGRANDE, M., PAYET, V., DAVID, C., SANS, X., BLANCO-MORENO, J., COOPER, J., GASCOYNE, K., ANTICHI, D., BARBERI, P., BIGONGIALI, F., SURBÖCK, A., KRANZLER, A., BEECKMAN, A., WILLEKENS, K., LUIK, A., MATT, D., GROSSE, M., HESS, J., CLERC, M., DIERAUER, H., MÄDER, P., 2014. How organic farmers practice conservation agriculture in Europe. Renewable Agriculture and Food Systems, doi:10.1017/S1742170514000477.
- RODRIGUEZ, A., BONIN, L., BURIDANT, C., DUROUEIX, F., DUVAL, R., GAUTELLIER VIZIOZ, L., LABREUCHE, J., PERRIOT, B., VUILLEMIN, F., 2019. Glyphosate en cultures assolées : efficacité des alternatives. Phytoma 729, 20-25.
- SOENEN, B., BONNEFOY, M., DELPECH, C., PIQUEMAL, B., DESCAZEUX, P., DEGAN, F., LAURENT, F. 2019. Mise au point du pilotage intégral de l'azote avec le modèle de culture CHN : approche « CHN-conduite ». Agronomie, Environnement & Sociétés, 9-1, 75-86.