

Alternatives au glyphosate : des leviers aux efficacités variables

Jérôme Labreuche(1), Fanny Vuillemin(2), Pascale Metais(3), Sophie Dubois(1), Lise Gautellier Vizioz(1), François Piraux(1)

(1) Arvalis institut du végétal, 91720 Boigneville j.labreuche@arvalis.fr l.gautelliervizioz@arvalis.fr f.piraux@arvalis.fr

(2) Terres Inovia, 31 450 Baziège f.vuillemin@terresinovia.fr

(3) Arvalis institut du végétal, 63360 Sainte-Beauzire p.metais@arvalis.fr

Avec la collaboration de Ludovic Bonin, Damien Brun, Louise Crochemore, Céline Drillaud, Franck Duroueix, Rémy Duval, Emmanuelle Heritier, Nicolas Munier, Valentin Naudet, Benjamin Perriot, Alain Rodriguez ainsi que la contribution de R2E (Réseau d'Excellence Expérimentale)

Alternatives au glyphosate : des leviers aux efficacités variables

Les techniques alternatives au glyphosate sont assez nombreuses en grandes cultures. Elles ont été caractérisées dans le cadre du projet AGATE GC. Elles reposent sur des leviers préventifs (gestion du désherbage dans la rotation, agencement des cultures et couverts...) ou curatifs de gestion de l'interculture. Le travail du sol reste le levier de substitution le plus accessible. Le labour réduit de manière notable les besoins en glyphosate. En l'absence de labour, le travail du sol superficiel peut présenter des efficacités variables selon les conditions. Son efficacité est globalement très bonne sur les adventices annuelles dicotylédones, quel que soit leur stade. Elle reste satisfaisante sur jeunes plantules de graminées annuelles jusqu'au stade 2-3 feuilles. En revanche, de début tallage au stade montaison, les graminées se révèlent plus complexes à détruire, avec une forte dépendance aux conditions climatiques (caractère plus ou moins séchant du climat, humidité du sol) et au type d'outil de travail du sol utilisé. La destruction de ces graminées tallées par un travail du sol superficiel a été modélisée et intégrée dans le modèle J-Dispo, ce qui ouvre la perspective de réaliser des études fréquentielles pour évaluer la faisabilité dans différentes situations (sol, climat, période de l'année...). Cela peut être utilisé pour la conception de systèmes de culture moins dépendants de l'usage du glyphosate, en évaluant au cas par cas l'efficacité et la faisabilité des différentes alternatives au glyphosate et en apprenant à les combiner entre elles.

Alternative techniques to glyphosate: different methods with various efficiencies

Alternative techniques for weed control during the intercropping period are numerous in arable cropping systems. They have been characterized in the AGATE GC project. They are based on preventive (weed control in the cropping system, succession of crops and cover crops...) or curative measures taken during the intercropping period. Soil tillage remain the main alternative to glyphosate. Ploughing reduces significantly the use of this active ingredient. For minimum tillage techniques, shallow cultivations have very good efficiencies for broadleaf weeds destruction, whatever their stage. It is also satisfying on young grasses (less than 2 or 3 leaves). However, from the beginning of tillering to stem elongation, grasses destruction is more complex and depends on the ability to dry out plants (climate, soil moisture) and the kinds of machinery. The destruction of developed grasses has been modeled and integrated into the "J-Dispo" model, which will help to made frequency studies to assess its feasibility in different situations (soil, climate, period of the year...). It will be very useful for the design of new cropping systems less dependent on glyphosate, by evaluating on a case-by-case basis the efficiency and feasibility of the alternative techniques and their combination.

INTRODUCTION

Le glyphosate est une substance active foliaire systémique non sélective 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 utilisé 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 concernait avant tout la période d'interculture, en visant la destruction d'espèces annuelles (Bonin *et al.*, 2021). Ainsi, toutes situations confondues, la gestion des repousses du précédent concernait 53 % des volumes de glyphosate utilisés au total, et celles des adventices annuelles, 41 % (graminées ou dicotylédones). 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).

Les partenaires du projet AGATE GC ont évalué les différentes alternatives à l'usage du glyphosate, en combinant des expérimentations et leur expertise. Les différents leviers ont été évalués mais c'est surtout le travail du sol qui a été utilisé dans les expérimentations. Il 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.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Présentation des essais et variables mesurées

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 viables. 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.

Nous avons ainsi rassemblé les données de 55 essais. Les intercultures étudiées peuvent précéder des cultures d'automne (blé, colza, orge) mais plus fréquemment des cultures de printemps (betterave, chanvre, lin, maïs, orge, pois, soja, sorgho, tournesol). Les itinéraires techniques ont été mis en œuvre dans différentes situations (types de sol, types d'interculture, matériel...). La plupart des itinéraires n'intégraient pas de labour mais en revanche des déchaumages profonds à très superficiels. L'absence de glyphosate a fréquemment engendré une augmentation du nombre de passages d'outils de travail du sol. 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). Elle a en général été observée à deux périodes : au semis de la culture et dans la culture suivante. Elle a aussi

parfois 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. Pour les observations de la flore après un passage d'outil, nous avons pris soin de bien distinguer, si besoin, les adventices présentes avant le passage d'outil et qui n'auraient pas été détruites de celles qui auraient levé après ce passage, de sorte de bien distinguer la destruction des adventices de l'effet « faux-semis ».

Seules ont été prises en compte les situations suivantes :

- Densité d'adventices avant destruction d'au moins 0.1 plante/m².
- Travail du sol superficiel (<25 cm et le plus souvent <15 cm), réalisé sur 100% de la surface du sol (travail partiel du sol exclu comme un déchaumeur à disques passé trop superficiellement ou une herse étrille) et sans retournement du sol (labour exclu). Les autres opérations hors travail du sol superficiel ne sont pas non plus intégrées (broyage, roulage, herbicides...).
- Espèces annuelles (adventices, repousses de culture et couverts végétaux). Les vivaces ou bisannuelles nécessitent un suivi long après un passage mécanique. Nos suivis de courte durée ne permettent pas de conclure pour ces espèces.

Nous avons effectué 465 observations en croisant une espèce d'adventice à un stade donné pour un mode de destruction à une date donnée. Lorsque plusieurs espèces cohabitaient dans la parcelle, l'analyse a été réalisée espèce par espèce. Les sols déchaumés et non labourés (ou avant un labour) 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 sur reprise de labour » ont été réalisées sur un labour déjà repris une fois (donc bien renivelé). Sur l'ensemble des données, les principaux matériels utilisés sont : déchaumeurs à disques ≤ 8 cm (39 données) ; outils à dents ≤ 8 cm (155 données) ; outils à dents entre 9 et 15 cm (71 données) ; outils animés ≤ 8 cm (83 données) ; combinaison de plusieurs passages d'outils (81 données). Les outils à disques utilisés étaient exclusivement des déchaumeurs à disques indépendants, réglés suffisamment profond pour « scalper » 100% de la surface du sol. Les outils animés étaient très majoritairement des herses rotatives. Les outils à dents étaient assez divers : cultivateurs, chisels uniquement pour des passages à plus de 16 cm, vibroculteurs ou vibrodéchaumeurs pour des passages à moins de 15 cm. Pour les passages les plus superficiels, les outils à dents étaient équipés soit de socs larges ou « pattes d'oie », soit d'un nombre élevé de dents (vibroculteurs) pour déraciner les adventices sur 100% de la surface. Après une analyse montrant un effet significatif du type d'outil et non de la profondeur de travail, nous avons regroupé les interventions en 3 catégories, quelles que soient les profondeurs de travail : outils animés, outils non animés (disques ou dents), combinaisons de plusieurs passages (1 à 2 passages d'outil à dents, 0 à 1 passage d'outil animé).

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 couverts ont été traités de la même manière que les adventices, en étant séparés entre dicotylédones et graminées et selon leur stade. Ces derniers ont été pris en compte selon une échelle de la méthode Barralis : stade A = jeune plantule (≤ 3 feuilles) ; stade B = plantule (3-6 feuilles pour les dicotylédones ; début tallage des

graminées) ; stade C = plante jeune (> 6 feuilles pour les dicotylédones ; plein tallage des graminées) ; stade D = plante adulte (ramification ou montaison) ; stade E = floraison (boutons floraux, floraison, épiaison) ; stade F = grenaison. Les familles et stades ont été regroupés (« Famille_stade ») de la manière suivante : Graminées stade A (26 données) ; Graminées stade B (59 données) ; Graminées stade C ou D (120 données) ; Dicotylédones stade A (60 données) ; Dicotylédones stade B ou C (126 données) ; Dicotylédones stade D ou E ou F (74 données).

La taille des mottes après l'intervention mécanique a été évaluée visuellement *a posteriori* selon une échelle de 1 à 4 (1-grossier avec de nombreuses mottes > 3 cm : 152 données ; 2-assez grossier avec quelques mottes > 3 cm : 173 données ; 3-fin avec peu de mottes > 3 cm : 110 données ; 4-très fin avec peu de mottes > à 1 cm : 42 données). 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. L'impact du gel le jour de l'intervention mécanique a été évalué en séparant les situations où il a gelé à au moins -3°C (74 situations) des autres (391 situations).

1.2. Analyse des résultats d'essai

Le jeu de données a d'abord été décrit en termes de répartition des résultats selon différentes variables descriptives des situations étudiées. Ces variables n'étant pas indépendantes les unes des autres, l'analyse de chacune séparément des autres peut aboutir à des conclusions erronées. Par exemple, la comparaison entre les sols déchaumés non labourés et les préparations sur reprise de labour montre de meilleures efficacités dans le second cas mais elle est biaisée par la flore et son stade qui peuvent être différents (graminées tallées nettement plus représentées en situations non labourées, au contraire des jeunes plantules dicotylédones qui dominent la flore sur reprise de labour). Les conditions climatiques lors de l'intervention peuvent elles aussi être différentes : sortie d'hiver ou printemps pour les reprises de labour, de l'automne ou printemps en situation non labourée.

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.

Portant sur les mêmes variables, une « forêt aléatoire » (ou Random Forests) a été réalisée. Les forêts aléatoires sont construites à partir d'un grand nombre d'arbres de décision, entraînés sur un échantillon bootstrap de données (réplication multiple des données à partir du jeu de données étudié, selon

les techniques de rééchantillonnage), et considérant à chaque embranchement une sélection aléatoire de variables explicatives. Dans le cas de variables à prédire quantitatives, les valeurs prédites par chaque arbre sont ensuite moyennées pour fournir une estimation pour l'ensemble de la forêt. Dans chaque arbre de décision, ce sont les valeurs prises par chaque prédicteur dans l'échantillon qui dictent la valeur prédite. On peut mesurer l'importance d'une variable explicative en permutant aléatoirement les valeurs prises par cette variable. Cette permutation aléatoire « perturbe » la prédiction et, plus une variable est importante, plus la qualité de la prédiction est impactée. On peut donc mesurer l'importance de chaque prédicteur en comparant l'erreur de prédiction de la forêt avant et après permutation des valeurs prises par ce prédicteur.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Efficacité des alternatives à l'usage du glyphosate

Une des productions du projet AGATE GC a été de recenser les alternatives au glyphosate, déjà connues antérieurement au projet ou explorées pendant le projet, pour en évaluer les forces et faiblesses (Labreuche *et al.*, 2021a). Elles sont décrites dans le tableau 1, en allant des leviers préventifs aux curatifs.

Les parcelles avec de fortes abondances, surtout s'il s'agit de graminées adventices ou repousses de céréales, sont plus difficiles à gérer sans glyphosate que les parcelles propres ou à faible stock semencier. C'est pourquoi tous les leviers de gestion du désherbage dans la rotation peuvent s'avérer très intéressants, autant pour gérer la flore dans les cultures que pendant l'interculture. Le broyage des menues pailles, encore très peu répandu dans les exploitations agricoles françaises, semble être un levier très prometteur de gestion des repousses du précédent notamment. Les enchaînements de cultures ou couverts peuvent aussi être adaptés de manière à limiter les levées d'adventices. Certains précédents récoltés tard et/ou ne générant pas de repousses facilitent la gestion de l'interculture et peuvent être si possible mobilisés. C'est par exemple le cas des betteraves ou du maïs grain qui généreront moins de salissement hivernal qu'une céréale à paille, ce qui peut être appréciable pour implanter sans labour une orge de printemps à une date précoce en sortie d'hiver avec un climat peu séchant. Alternier des cultures dicotylédones et graminées peut aussi faciliter la gestion des repousses dans la culture suivante en offrant des possibilités de rattrapage chimique, même si cela ne résoud pas le problème des graminées adventices résistantes à certains herbicides.

Dans tous les cas, il est nécessaire de garder l'objectif de semer la culture sur un sol exempt d'adventices annuelles viables. Si ce n'est pas le cas, les adventices déjà installées risquent d'être très difficiles à détruire dans la culture, notamment s'il s'agit de graminées résistantes à certains modes d'action herbicides. Non détruites car peu sensibles aux herbicides racinaires (déjà levées) comme foliaires (stade trop développé), elles risquent de se montrer très concurrentielles de la culture et de produire des semences, augmentant ainsi le stock semencier pour les années à venir. Les leviers curatifs sont donc très importants dans la plupart des cas pour semer sur un sol « propre » (tableau 2). 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 bonne efficacité sur un nombre limité de cibles, parmi les

dicotylédones principalement (tableau 2). Le désherbage électrique s'est aussi montré d'une efficacité variable selon les adventices, avec notamment des limites sur graminées et sol humide (Brun, 2020).

Tableau 1 – Recensement d’alternatives à l’usage du glyphosate.

Type de leviers	Leviers
Préventif : réduire le stock semencier	Gestion du désherbage dans la rotation : labour, faux-semis, rotation culturale, décalage de la date de semis, désherbage mécanique ou chimique, broyage ou exportation des menues pailles...
Evitement : réduire les levées d’adventices, avoir des plantes plus faciles à gérer	Précédent cultural laissant peu ou pas de repousses ou de levées d’adventices (ex : betteraves, maïs grain comparés aux céréales à pailles)
	Faible bouleversement du sol lors du semis du couvert et des cultures (disques, dents fines, volée) pour limiter leur salissement
	Alterner cultures graminées et dicotylédones pour faciliter la gestion des repousses du précédent dans la culture suivante
	Choisir des couverts faciles à gérer mécaniquement ou gélifs, voire facilement contrôlables dans la culture suivante
Atténuation : limiter le développement des adventices levées	Limiter les périodes d’interculture. Enchaîner culture puis culture ou couvert
	Couverts bien implantés, denses et à couverture rapide du sol
	Techniques de destruction qui même partiellement efficaces limitent le développement des adventices et facilitent leur destruction ultérieure
Curatif : destruction d’adventices	Labour
	Travail du sol superficiel
	Broyage, roulage, pâturage, gel
	Herbicides pendant l’interculture (dicamba et 2,4D)
	Herbicides ou désherbage mécanique en rattrapage dans la culture suivante
	Désherbage électrique

Tableau 2 – Efficacité de différentes techniques de destruction des couverts végétaux et adventices.

	Méthodes chimiques		Méthodes physiques								Autres méthodes			
	Glyphosate	Herbicides avec AMM actuelles	Labour	Travail du sol superficiel 0-8 cm (1) temps séchant	Travail du sol superficiel 0-8 cm (1) temps peu séchant	Travail du sol superficiel 0-8 cm (1) temps humide	Travail du sol superficiel sur 8-15 cm (1) temps séchant	Travail du sol superficiel sur 8-15 cm (1) temps peu séchant	Travail du sol superficiel sur 8-15 cm (1) temps humide	Broyage, Rolo faca, Rouleau hacheur	Rouleau lourd sur gel (T° < -3°C)	Gel	Désherbage électrique	Pâturage
Vivaces dicotylédones (yc partie souterraine)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Vivaces graminées (yc partie souterraine)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Graminées (stade 1-3 feuilles)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	< -15°
Graminées (stade tallage ou montaison)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	< -15°
Graminées (stade fin montaison, épisaison)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Dicotylédones (stades cotylédons à 2-3 feuilles)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Dicotylédones (stades > 3 feuilles)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Gaillet et geranium (stades > 3 feuilles)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	< -15°
Couverts dicots : radis fourrager	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	-8 à -13°
Couverts dicots : vesce ou féverole fleuries	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	-5 à -10°
Couverts dicots : moutarde ou phacélie développées	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	-5 à -10°
Couverts dicots : niger, tournesol, sarrasin	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0 à -4°
Couvert permanent (luzerne, trèfle blanc...)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Destruction des prairies ou jachères	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
(1) : travail superficiel sur 100% de la surface du sol				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Le labour se montre très efficace pour détruire quasiment toutes les annuelles si le sol est correctement retourné. Seules

quelques bisannuelles ou pluriannuelles sont capables de repartir ultérieurement (radis fourrager, luzerne...). 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 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, largement décrit dans la partie 2.2 de cet article, 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 séchantes, adapter si possible ses enchaînements de culture...) ou curatives (labour, reporter la destruction au printemps en conditions séchantes,

herbicide...).

2.2. Destruction des adventices par un travail du sol superficiel

L'analyse de la destruction des adventices à l'aide des forêts aléatoires montre un très fort impact des Famille_stade (Graminées stade A, Graminées stade B, Graminées stade CD, Dicotylédones stade A, Dicotylédones stade BC, Dicotylédones stade DEF). Apparaissent comme des facteurs explicatifs de moindre importance l'humidité du sol lors de l'intervention, l'indicateur climatique et le type d'outil (animé, non animé ou combinaison). Le gel lors du passage d'outil ne semble pas avoir d'importance (figure 1).

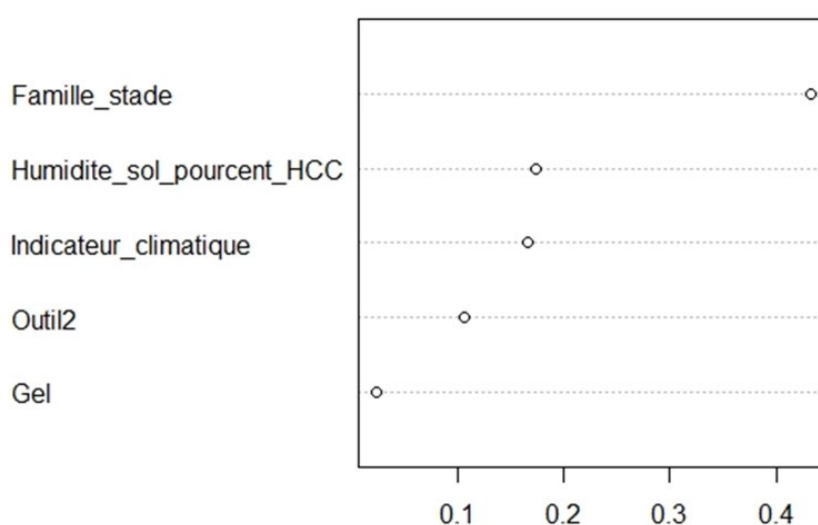


Figure 1 – Importance des variables pour la prédiction de la destruction des adventices (forêts aléatoires).

Plus la valeur est faible, moins le facteur a d'importance pour expliquer le niveau d'efficacité.

Le modèle linéaire mixte retenu inclut des variables explicatives très proches de celles qui ressortaient dans les forêts aléatoires. Le type d'outil est hautement significatif alors que l'indicateur climatique, l'humidité du sol, les Famille_stade et l'interaction indicateur climatique - Famille_stade 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 n'ont pas été retenus car ils ne ressortaient pas significativement dans le modèle et n'amélioraient pas la variance expliquée.

Les dicotylédones se montrent globalement très sensibles à la destruction mécanique par un travail superficiel du sol (figure 2). C'est particulièrement vrai pour des jeunes plantules au stade A (≤ 3 feuilles) ou celles qui ont émis ou sont en train d'émettre leur appareil reproducteur (stades DEF : élongation, floraison, grenaison). Les stades intermédiaires B et C se montrent globalement sensibles mais avec des différences entre espèces (tableau 3). L'impact de l'indicateur climatique devient un peu plus élevé sur les dicotylédones à ces stades B et C, l'efficacité de destruction se dégradant légèrement sous des climats arrosés.

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. Sur de fortes populations, un seul passage d'outil peut se montrer insuffisant pour pouvoir semer sur sol propre (objectif visé de 100% d'efficacité). Les graminées au stade B (début tallage) ou CD (plein tallage-montaison) s'avèrent nettement plus difficiles à détruire que les jeunes plantules de graminées ou les dicotylédones, tous stades confondus. C'est particulièrement vrai pour des indicateurs climatiques positifs (climats plutôt humides après le passage de l'outil). Ces conditions peu séchantes sont favorables à leur repiquage. Les graminées déracinées gardent souvent une partie de leur système racinaire fasciculé. Ce dernier est dense et se sépare difficilement de la terre qui l'entoure, contrairement aux racines de la plupart des dicotylédones. Cela explique l'effet marqué de l'indicateur climatique sur ces graminées (figure 2). L'humidité du sol a aussi un impact sur la destruction des adventices. Il est surtout sensible sur graminées tallées en conditions non séchantes. Les sols secs (50% de la Hcc sur la figure 3) 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. Cet effet de l'humidité du sol peut trouver plusieurs explications. Il

est plus facile de dessécher des plantes sur un sol sec qu'un sol humide, toutes choses égales par ailleurs. Le travail du sol produit aussi dans ces conditions une terre moins motteuse, 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. Il faut cependant signaler que la taille des mottes n'a pas montré d'effet significatif ni amélioré le modèle. Le fait d'évaluer ce critère visuellement et a posteriori après les interventions en 4 grandes classes a sans doute manqué de finesse. 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.

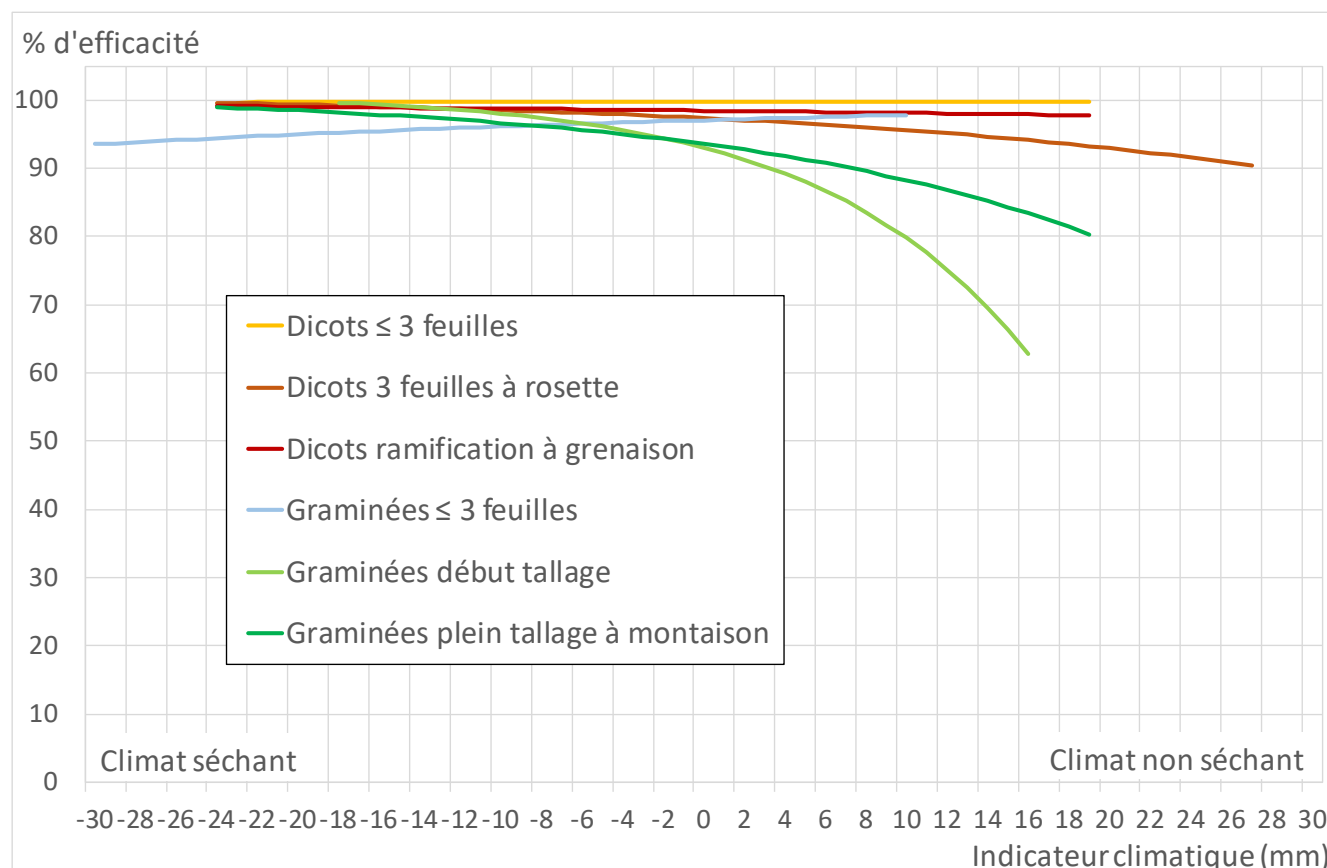


Figure 2 – Impact de l'indicateur climatique sur la destruction des adventices, selon leurs familles et stades. Données simulées par le modèle mixte pour une humidité de 70% de la Hcc et un outil de travail du sol non animé.

En conditions climatiques séchantes, les écarts se réduisent nettement entre familles d'adventices et stades, niveaux d'humidité du sol ou type d'outil (figures 2 et 3).

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. Les données étaient trop peu nombreuses sur vulpie queue de rat et Brome sp. pour conclure.

Ces résultats ont permis d'appréhender un certain nombre de facteurs influençant la destruction des adventices par un travail du sol superficiel. L'influence des espèces ou des familles et de leur stade est résumée dans le tableau 3. Une distinction est faite entre situations selon le niveau d'efficacité : élevé permettant de viser près de 100% d'efficacité ; assez élevé permettant d'espérer une destruction élevée mais non totale,

ce qui oblige à prévoir deux passages d'outils à quelques jours d'intervalle, si la population d'adventices n'est pas très faible ; moyen ou irrégulier ne permettant pas d'espérer détruire à court terme les adventices. Les conditions plus ou moins séchantes, selon le climat et l'humidité du sol, sont également prises en compte pour les graminées aux stades B à D. Nous l'avons également intégré par extrapolation pour trois dicotylédones qui se sont montrées moins sensibles que la plupart des autres dicotylédones.

Enfin, il est à noter qu'au-delà de la destruction des adventices au sens strict par le travail du sol superficiel, celui-ci peut parfois remettre en germination d'autres adventices en remuant le sol. Ces dernières devront être gérées ultérieurement.

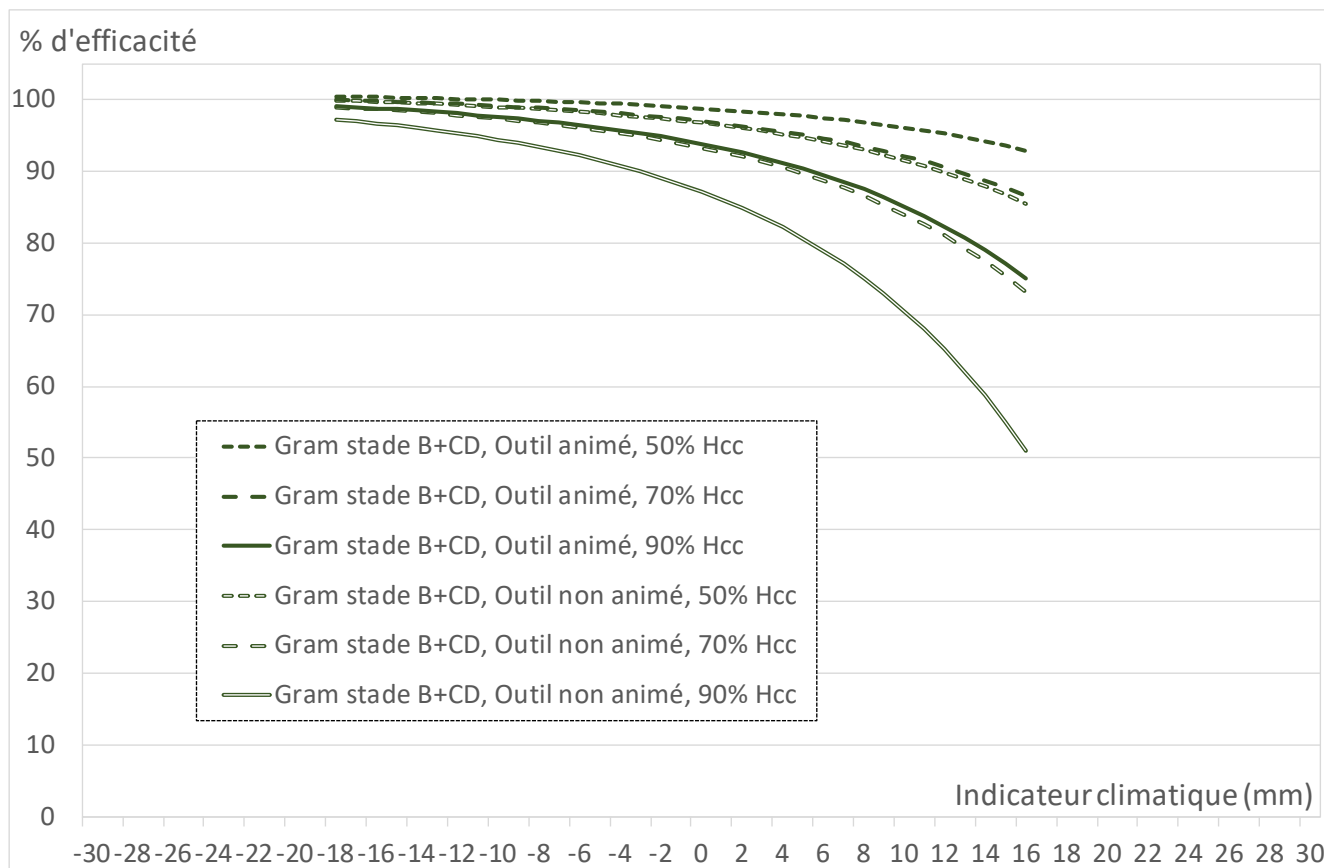


Figure 3 – Impact de l'indicateur climatique, de l'humidité du sol et du type d'outil sur la destruction des graminées aux stades B, C et D. Données simulées par le modèle mixte.

Tableau 3 – Sensibilité au travail du sol superficiel de différentes espèces ou familles d'adventices ou couverts végétaux selon leur stade et les conditions climatiques.

	Sensibles <i>Un seul passage suffit</i>	Assez sensibles <i>Deux passages sont nécessaires</i>	Moyennement sensibles <i>Efficacité insuffisante ou irrégulière</i>
Adventices et couverts dicotylédones	Toutes dicotylédones stade A		
	Laiterons, Sénéçons, Mercuriales, Renouées tous stades	Colza, Matricaire, Véroniques, Phacélie, Vesces, Radis chinois stades B à D	Radis fourrager stade C à D
	Toutes dicotylédones stades EF	Gaillet, Géranium, Trèfle incarnat stades B à D, conditions séchantes	Gaillet, Géranium, Trèfle incarnat stades B à D, conditions non séchantes
Adventices et couverts graminées		Graminées stade A	
		Graminées stades B à D, conditions séchantes	Graminées stades B à D, conditions non séchantes

2.3. Combinaisons de leviers

Il existe différentes alternatives à l'usage du glyphosate. En pratique, il semble nécessaire de combiner ces leviers 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 (tableau 1). 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...). L'efficacité des différents leviers sera différente d'un cas à l'autre et les itinéraires doivent s'adapter en conséquence. Pour évaluer la faisabilité du travail du sol superficiel en termes de destruction des adventices, les conditions requises pour

détruire des graminées tallées (voir partie 2.2 de cet article) 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. Une analyse fréquentielle sur une vingtaine d'années est souvent réalisée pour évaluer la faisabilité d'opérations culturales. 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 (tableau 3). 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.

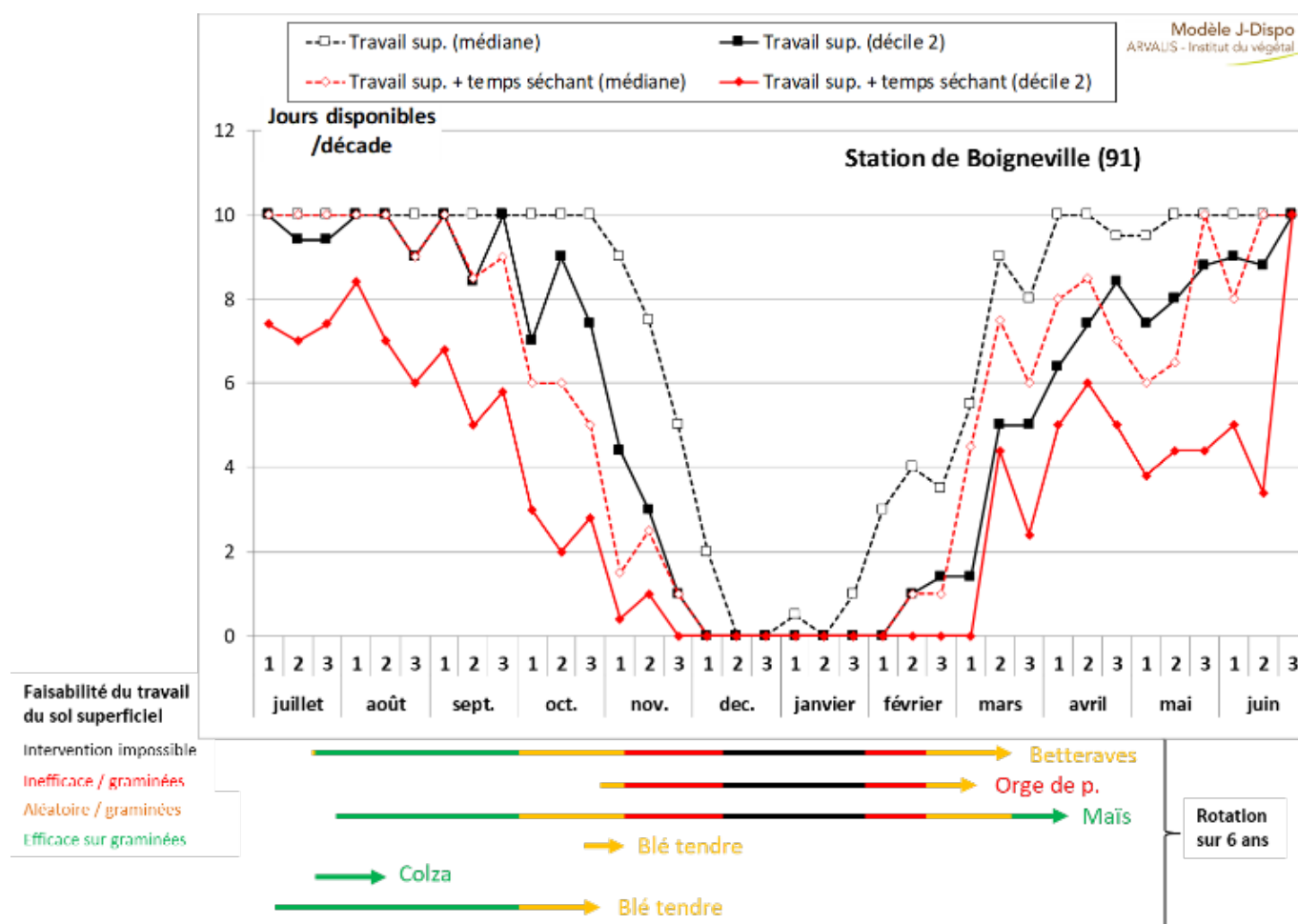


Figure 4 – Nombre de jours disponibles par décennie pour réaliser un travail du sol superficiel sans autre contrainte ou avec des conditions séchantes permettant de détruire des graminées tallées. Simulations sur 18 campagnes de 2002/2003 à 2019/2020 pour un limon argileux profond sur calcaire et la station météo de Boigneville (91).

Le schéma sous la figure positionne 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.

Détruire des graminées développées avant de semer une culture avec un travail du sol superficiel peut donc se montrer d'une faisabilité très variable selon la culture à semer. Positionner une rotation culturale sur ce type de diagramme peut permettre d'analyser chaque interculture en termes de période plus ou moins favorable à la destruction sans recourir au travail profond. Si les jours disponibles se montrent trop faibles pour compter sur le travail du sol superficiel, d'autres leviers préventifs, d'évitement, d'atténuation ou curatifs peuvent être mobilisés.

Cet exercice a été réalisé sur l'essai A de Boigneville (anciennement essai travail du sol de longue durée), dans lequel des stratégies alternatives aux herbicides pendant l'interculture

et dans les cultures sont testées selon différents régimes de travail du sol. Les six cultures de la rotation sont positionnées sous la figure 4. Trois cultures de printemps sont suivies de trois cultures d'automne. Chaque interculture (de la récolte du précédent au semis de la culture) est symbolisée par une flèche. Des couleurs font le lien avec les jours disponibles présentés sur la figure au dessus. Les betteraves sucrières sont implantées fin mars ou début avril derrière un précédent blé. Les jours disponibles pour détruire des graminées tallées à cette période (potentiellement repousses de blé, ray-grass et pâturin annuel) sont encore peu nombreux. Il faut aussi être vigilant au dessèchement du lit de semences car la graine de betterave se sème peu profond, ce qui pose question pour à la fois assurer la

levée des betteraves tout en détruisant des adventices par dessèchement. La gestion des graminées en itinéraire sans labour s'annonce très délicate. S'il est possible et envisagé, un labour d'hiver apportera une grande sécurité à ce niveau. Sans retournement du sol, se passer de glyphosate semble très aléatoire. Si le couvert est sale (fort envahissement en graminées), une piste envisagée dans l'essai A est de réaliser une destruction anticipée du couvert entre début et mi-octobre, à une période où le climat n'est pas encore trop défavorable à la destruction de ces graminées (sauf automne exceptionnellement humide comme en 2019). A noter que cette destruction précoce n'est pas autorisée par la directive Nitrates.

Les jours disponibles sont encore plus faibles pour planter une orge de printemps dès fin février. Un précédent blé, suivi d'un couvert qui présenterait une population significative de repousses de blé et graminées adventices, semble très compliqué à gérer en l'absence de labour et de glyphosate si on souhaite garder un semis relativement précoce avant mi-mars. Il serait impossible de gérer dans l'orge ces graminées non détruites au moment du semis. C'est ce qui nous a conduit dans l'essai A à placer l'orge derrière betteraves, un précédent récolté tard, sans repousses et peu propice au salissement l'hiver suivant. Dans d'autres rotations, cela aurait pu être un précédent maïs grain.

Le semis de maïs se réalise en conditions nettement plus favorables sur un plan climatique. Le climat redevient assez séchant en avril. Une ou deux préparations superficielles (≤ 4 cm) du lit de semences peuvent permettre de gérer conjointement les adventices par dessèchement. Le semis du maïs peut se faire légèrement plus profond, dans le « frais ».

Le premier blé de la rotation vient derrière le précédent maïs grain. La période de semis vers début novembre est peu favorable au niveau des conditions « séchantes ». Le maïs est cependant souvent propre et peu infesté en graminées automnales. Si ce n'est pas le cas, une implantation sans labour peut être problématique. Les allées d'irrigation sont particulièrement à surveiller car souvent favorables à ce type de salissement. A titre expérimental, du travail du sol superficiel a été réalisé à deux reprises en septembre et octobre 2021 dans les allées d'irrigation du maïs de l'essai A afin d'anticiper la gestion des adventices (ray-grass et pâturins tallés) avant le semis du blé suivant. Si cela peut apporter une solution au niveau du salissement, cela peut poser question quant aux possibilités de semis en conditions humides sur une terre ameublie et affinée à l'avance.

La culture suivant le blé est un colza. La période est très favorable au dessèchement des adventices mais aussi à celui du lit de semences. Si le salissement avant semis ne concerne que des repousses de blé, dans l'objectif de réussir la levée du colza, il semble raisonnable de préserver l'humidité du lit de semences en travaillant le sol au minimum et de détruire les repousses dans le colza.

La dernière culture de la rotation est un blé de colza. La période de semis devient moins favorable à la destruction de graminées tallées par un travail superficiel. Les semaines qui précèdent sont cependant plus propices à une bonne efficacité. Une destruction anticipée en septembre de ces graminées développées peut atteindre cet objectif. Ce travail du sol peut cependant faire office de faux-semis et provoquer de nouvelles levées. Si la météo n'est pas trop défavorable (comme elle le fût l'automne 2019 par exemple), les relevés peuvent être gérées par une ou deux façons superficielles lors du semis du blé et un

peu avant.

CONCLUSION

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. Le labour réduit de manière forte les besoins en glyphosate. En l'absence de labour, le travail du sol superficiel peut présenter des efficacités de destruction variables selon les conditions. La destruction est globalement très bonne sur les adventices annuelles dicotylédones, quel que soit leur stade. Elle reste satisfaisante sur jeunes graminées annuelles jusqu'au stade 2-3 feuilles, quelles que soient les conditions. En revanche, de début tallage au stade montaison, les efficacités se révèlent moins bonnes, avec une forte dépendance aux conditions climatiques (caractère plus ou moins séchant du climat, humidité du sol) et au type d'outil de travail du sol utilisé. La modélisation des conditions adaptées pour une bonne destruction des graminées tallées a ouvert la voie à la prédiction de ce phénomène, pour en anticiper l'efficacité dans différentes conditions ou périodes. Cela peut être utilisé pour la conception de systèmes de culture moins dépendants de l'usage du glyphosate. Des premières recommandations ont été établies (Labreuche *et al.*, 2021b) et elles pourraient être affinées à une échelle locale en fonction d'approches de type « jours disponibles ». Une autre application pourrait être d'estimer de manière fréquentielle le retard potentiel de la date de semis d'une culture de printemps en vue d'obtenir la possibilité de réaliser une destruction mécanique d'adventices en conditions séchantes, comparativement à un semis sans cette contrainte. Il serait ensuite possible d'estimer les conséquences de ce retard de date de semis sur le rendement de la culture.

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. Certains leviers doivent être retravaillés et combinés : enchaînement de cultures, couverts végétaux, moyens de destruction sans travail du sol (rouleaux lourds, hacheurs ou couteaux ; broyeurs ; pâturage...). Avec les connaissances actuelles, il ne semble pas réaliste de faire de l'agriculture de conservation des sols (ACS) au sens strict (pas de travail du sol) à grande échelle en se passant de glyphosate. Des agriculteurs conventionnels ou en agriculture biologique adoptent néanmoins des formes moins strictes d'agriculture de conservation en faisant appel au moins ponctuellement à des façons culturales superficielles qui, combinées à d'autres pratiques (interventions en conditions séchantes, rotations culturales, couverts végétaux...), peuvent

aboutir à des semis sur des sols exempts d'adventices viables (Peigné *et al.*, 2014).

Les stratégies sans glyphosate augmentent souvent la terre fine créée avant le semis des cultures et peuvent ainsi stimuler les levées d'adventices dans ces dernières. Ce point mériterait d'être évalué de manière plus fine.

La recherche de nouvelles solutions doit aussi se tourner vers les nouvelles technologies, susceptibles d'apporter de nouveaux moyens d'action pour la destruction des adventices.

L'évaluation des techniques alternatives à l'usage du glyphosate doit être faite au fur et à mesure de la progression des connaissances, notamment sous l'angle socio-économique (temps de travail, jours disponibles, organisation du travail, investissement en matériel, charges de carburant...). Les conséquences socio-économiques de la suppression de cet usage peuvent être très variables selon les situations mais, lorsque les alternatives existent, peuvent se chiffrer jusqu'à un surcoût de 80 €/ha et un surcroît de travail de 1,4 h/ha (Carpentier *et al.*, 2020). Des ordres de grandeurs assez proches

avaient été identifiés dans un mémoire de fin d'étude encadré par ARVALIS (Dessienne, 2019). Une limite des études telles qu'elles ont été conduites jusqu'à présent est d'évaluer des scénarios dont la faisabilité n'est pas validée, en particulier sous l'angle de données techniques de type jours disponibles (prise en compte du climat plus ou moins séchant et de l'humidité du sol plus ou moins élevée pour réussir la destruction des graminées tallées). Le modèle J-Dispo nous permet désormais de corriger ces limites.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre des projets AGATE GC et J-DISTAS et financés par le Ministère en charge de l'Agriculture, avec la contribution financière du Compte d'Affectation Spécial pour le Développement Agricole et Rural (CASDAR).

REFERENCES 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 fil. Ecol. Biol. Mauvaises Herbes, Dijon, 59-68.
- Bisch P.E., Hubert L., Pinçonnet 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., Wissoq 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., Vuillemin F., Dubois S., Gautellier Vizios 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.
- Métais P., Bessard Duparc P., Trochard R., Soenen B., 2018. Estimation of available days for cultivation work: evaluation of J-Dispo tool using CHN dynamic crop model. 21th ISTRO International Conference. September 2018.
- Peigné J., Casagrande M., Payet V., David C., Sans X., Blanco-Moreno J., Cooper J., Gascoyne K., Antichi D., Bàrberi P., Bigongiali F., Surböck A., Kranzler A., Beekman 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., Gautelliez Vizios 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., Descazeaux 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.