

Végéphyll – 24^e CONFÉRENCE DU COLUMA
JOURNÉES INTERNATIONALES SUR LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES
ORLÉANS – 3, 4 et 5 DÉCEMBRE 2019

**RETRAIT DU GLYPHOSATE : ANALYSE COMPARATIVE DE FAISABILITE ET D'EFFICACITE DES
PRATIQUES AGRONOMIQUES DE REMPLACEMENT**

A. RODRIGUEZ ⁽¹⁾, L. BONIN⁽²⁾, C. BURIDANT ⁽³⁾, F. DUROUEIX ⁽⁴⁾, R. DUVAL ⁽⁵⁾, L. GAUTELLIER-VIZIOZ ⁽⁶⁾,
J. LABREUCHE ⁽⁶⁾, B. PERRIOT⁽⁶⁾, F. VUILLEMIN ⁽⁷⁾

⁽¹⁾ Acta, 6 chemin de la côte vieille, 31400 Baziège.

⁽²⁾ Arvalis - Institut du végétal, 241 route de Chapulay, 69330 Pusignan.

⁽³⁾ FNAMS, 2 bis rue Jeanne d'Arc, 10013 Troyes.

⁽⁴⁾ Terres Inovia, 1 rue Péchabout, 47 000 Agen.

⁽⁵⁾ ITB, 45 rue de Naples, 75 0008 Paris.

⁽⁶⁾ Arvalis - Institut du végétal, Station expérimentale, 91 720 Boigneville.

⁽⁷⁾ Terres Inovia, 6 chemin de la côte vieille, 31400 Baziège.

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la cellule de réflexion nationale CRIT (Cellule Recherche Innovation Transfert) les Instituts Techniques Agricoles ont listé et évalué *a priori* l'ensemble des pratiques de substitution aux usages du glyphosate (*N-phosphonométhyl glycine*) en cultures assolées. Cette analyse porte sur le niveau de maturité de la technique, la faisabilité et l'efficacité à dire d'experts. Ce travail permet d'identifier et de hiérarchiser les situations selon leur niveau de difficulté, les pratiques facilement mises en œuvre ou les impasses techniques et d'orienter les programmes de recherche vers les axes prioritaires.

Mots-clés : glyphosate, pratiques alternatives, cultures assolées, comparaison multicritères.

ABSTRACT

As part of the national research unit CRIT (Cell Research Innovation Transfer) the Agricultural Technical Institutes have listed and assessed all practices for glyphosate substitution in cropping systems. This analysis focuses on TRL level, feasibility and effectiveness valued by experts opinions. This work highlights easy-to-implement practices, sensitive situations or technical deadlocks and will directly focus on research programs towards priority areas.

Keywords : glyphosate, alternative practices, cropping system, multicriteria comparison.

INTRODUCTION – CONTEXTE :

Avant l'arrivée des herbicides, la lutte contre la flore adventice reposait essentiellement sur le choix des successions culturales : alternance de cultures étouffantes et salissantes, introduction de plantes dites sarclées et pratique régulière du labour. L'évolution vers des systèmes de culture tels que nous les connaissons aujourd'hui n'a été possible que grâce aux herbicides (Sebillotte, 1969). Dès les années 70, les tous premiers herbicides totaux non sélectifs utilisés hors culture (diquat et paraquat) ont permis de réduire le nombre de passages de travail du sol et d'augmenter les surfaces cultivées en optimisant les itinéraires techniques.

Le glyphosate (*N-phosphonométhyl glycine*) est un herbicide foliaire systémique non sélectif à large spectre (Acta, 2019) développé par Monsanto (brevet 1969, AMM 1974, domaine public en 2000). Son usage fut initialement orienté vers la lutte contre les espèces vivaces puis son utilisation a été très rapidement étendue à la gestion des salissements dans l'interculture. Dès son introduction sur le marché, il a connu un grand succès grâce à ses propriétés intrinsèques. Le glyphosate pénètre exclusivement par voie foliaire dans le feuillage des plantes touchées par la pulvérisation, sans causer de dégâts ni aux plantes présentes lors du traitement mais ne recevant pas la bouillie herbicide, ni aux plantes émergeant après le traitement. De plus, après sa pénétration dans le végétal, il possède la propriété d'être véhiculé par la sève vers les zones en croissance, y compris celles des organes souterrains (rhizomes, racines...). Une telle propriété lui confère une bonne régularité d'action et un avantage unique pour éliminer des adventices vivaces qui auparavant, étaient mal détruites ou ne pouvaient l'être avec les herbicides existants (Ambolet *et al.*, 2017). La maîtrise des espèces vivaces devenait dès lors possible et leur présence en culture a régulièrement diminué jusqu'à un seuil largement acceptable (ARVALIS 2003, communication personnelle). En parallèle de la gestion des vivaces, le glyphosate est devenu un outil majeur de lutte contre les repousses et les adventices difficiles en interculture. Ce nouvel usage a été renforcé et généralisé après la mise en place des jachères liée à la politique agricole commune de 1992 (Citron *et al.*, 1995). A partir de cette période le labour systématique a été progressivement abandonné car il permettait une réduction des charges de mécanisation importante et correspondait aussi à une volonté d'améliorer la qualité des sols. Cette évolution fut permise par le recours au glyphosate. Une enquête très récente du réseau DEPHY FERME (DEPHY Ferme, 2018) « grandes cultures et polyculture-élevage » nous indique que cet herbicide est aujourd'hui presque exclusivement utilisé pour la destruction de couverts, le désherbage avant semis et la destruction des prairies temporaires.

Le glyphosate a donc été très largement utilisé pendant plusieurs décennies, pour répondre à des contraintes techniques (lutte contre les adventices annuelles et vivaces, réussite des systèmes en non labour voire semis direct) et économiques (le glyphosate garantit la maîtrise des coûts de ces techniques en limitant les charges de mécanisation). Cependant, il s'est retrouvé au premier plan de l'actualité le 12 mars 2015 quand le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC – agence émanant de l'OMS) déclare le glyphosate « cancérigène probable » pour l'homme (Decoin, 2016). Pourtant, le 12 novembre 2015, l'EFSA (Autorité européenne de sécurité des aliments) rend un avis favorable de maintien sur le marché et le 15 mars 2017 l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) déclare ne pas classer le glyphosate parmi les molécules cancérigènes. Le 24 octobre 2017 les députés adoptent une résolution demandant le retrait du glyphosate sous 5 ans. Le même jour le président E. Macron demande au gouvernement d'établir un plan de sortie du glyphosate sous les trois ans. Le 2 novembre 2017 les ministres de l'Agriculture et de l'Alimentation, de la Transition écologique et solidaire, de la Santé, et de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation saisissent l'INRA pour la rédaction d'un rapport concernant les usages et les alternatives au glyphosate dans l'agriculture française ; ce rapport sera remis le 30 novembre 2017. En avril 2018, le gouvernement décide d'engager un plan d'action global pour la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires avec un objectif de réduction de 25% en 2020 et 50% en 2025 et de mettre fin aux principaux usages

du glyphosate en 3 à 5 ans. Le 29 mai 2018 l'Assemblée Nationale rejette le texte d'inscription dans la loi d'une date de sortie du glyphosate.

MATERIEL ET METHODES

Suite à la saisine de l'INRA sur les utilisations du glyphosate, les Instituts Techniques Agricoles ont rédigé un document de synthèse intitulé « Les Instituts techniques agricoles et le glyphosate » (ICTA, 2017) dans lequel ils détaillent pour l'ensemble des productions végétales les conséquences prévisibles de la suppression du glyphosate. Ces travaux s'inscrivent dans la dynamique du groupe d'experts « protection intégrée » de la cellule Recherche Innovation Transfert lancée par le réseau ITA avec l'INRA et l'APCA en février 2018. Un état des lieux exhaustif des utilisations du glyphosate dans les systèmes céréaliers a été réalisé. Pour chaque usage nous proposons une évaluation technique, économique et environnementale des pratiques alternatives candidates. Ce travail de prospective suppose dans ses hypothèses de départ et dans ses produits de sortie de considérer l'échelle TRL (Technology Readiness Level) des solutions candidates pour rechercher plus de cohérence et de complémentarité. Partant de là, les partenaires se polarisent sur des alternatives matures dont le rapport bénéfice/risque est positif ou tout au moins acceptable.

RESULTATS

Le tableau I synthétise l'ensemble des usages/solutions candidates classées selon 4 catégories : mesures prophylactiques, méthodes culturales, méthodes physiques et méthodes biologiques. Chaque pratique alternative est notée selon 3 critères. La première note indique le niveau de maturité technologique (TRL) : A (pratique en usage, déjà commercialisé), B (pratique ayant montré son efficacité dans de nombreux cas), C (pratique validée dans des conditions expérimentales uniquement), D (pratique non aboutie mais preuves de concept existantes), E (principes théoriques établis). La deuxième note concerne la facilité de mise en œuvre (A facile et économiquement viable à E impossible à ce jour). La troisième note évalue l'efficacité « à dire d'experts » de A très efficace à E totalement inefficace. Le détail des différentes efficacités selon les cibles est porté dans la deuxième partie du tableau (par ex. vivaces dicotylédones, interculture dicotylédones...). Prenons l'exemple du labour comme technique de remplacement du glyphosate ; sans surprise sa note de maturité technologique est élevée (A) puisque cette technique est ancestrale mais la note de faisabilité est variable (A-D) indiquant ainsi la difficulté de mise en œuvre dans les « petites terres » et sols superficiels ou les systèmes sans labour. La deuxième partie du tableau nous indique son efficacité au regard des cibles : très efficace pour le retournement des prairies, la destruction des couverts végétaux et la maîtrise des graminées dans l'interculture. Son efficacité est bonne à variable sur espèces vivaces mais elle est inappropriée dans les systèmes SD (Semis Direct) ou dans la régulation des couverts.

a) Les méthodes prophylactiques présentées dans le tableau I (pureté des lots de semences, nettoyage du matériel, gestion des menues-pailles, entretien des bords de champs, compostage des fumiers, ...) sont des leviers très indirects permettant d'éviter la diffusion des graines d'adventices dans le milieu agricole et donc la contamination voire le salissement des parcelles. Ces mesures ne remplacent pas directement l'emploi du glyphosate, mais elles permettent à moyen ou long terme de réduire le stock semencier ou tout au moins d'éviter son accroissement et donc de faciliter la gestion des adventices. Il s'agit là de mesures de lutte intégrée. Si le niveau de maturité technologique de ces pratiques est très bon, la faisabilité et surtout l'efficacité de ces techniques sont toutes relatives, puisque l'effet ne se perçoit que sur le long terme. De plus, elles ne permettent pas de détruire des adventices déjà en place.

b) Autres mesures : de lutte intégrée, les méthodes culturales du tableau I (rotation et diversification des cultures, choix variétal, date et densité de semis, adaptation de la fertilisation et de l'irrigation)

sont des techniques ayant une très bonne maturité technologique puisqu'elles sont déjà pratiquées chez la plupart des agriculteurs et une assez bonne faisabilité (selon les types de pédoclimat). Cependant, à part le levier de la rotation pour lequel l'efficacité est bonne à l'échelle du système, ces autres leviers culturaux sont adaptés à la réduction des herbicides en culture, mais pas spécialement, ou indirectement, en interculture (c'est-à-dire en remplacement du glyphosate). Seul le décalage de la date de semis, plus réalisable et plus efficace en cultures de printemps et en céréales à paille, présente une efficacité non négligeable qui ne se perçoit pas qu'en culture mais également à l'échelle de la rotation. Citons par exemple, les réductions de populations d'ambrosies permises par le décalage de la date de semis d'un soja ou d'un tournesol.

c) Les méthodes physiques mentionnées dans le tableau I sont des pratiques très diverses. Autant le labour, le faux-semis, le déstockage par des déchaumages répétés et le broyage ou le roulage des couverts (en combiné ou non avec le gel) ont un niveau de maturité technologique très bon (déjà réalisés par bon nombre d'agriculteurs) et une faisabilité qui ne dépend que des conditions pédoclimatiques (que nous détaillons dans les deux parties suivantes « semer sur un sol propre » et « détruire les couverts »), autant les autres techniques comme le paillage/mulchage, la solarisation, les méthodes thermiques, le désherbage électrique et les robots, ne sont pour la plupart qu'à l'état de concept et de recherche active (robots et désherbage électrique plus récemment) et ne sont pas toujours adaptées aux grandes cultures (solarisation, méthodes thermiques et paillage/mulchage). Quant à l'efficacité des méthodes physiques réalisables en grandes cultures, elle dépend beaucoup du matériel disponible et des choix de systèmes de l'agriculteur (labour et travail du sol non envisageables pour les systèmes en Semis Direct), mais également de la météo (gel pour détruire les couverts, fenêtres d'intervention pour le travail du sol, ...). Le caractère aléatoire du travail du sol ne sécurise pas complètement la réussite des techniques de substitution.

d) Enfin, les méthodes biologiques (pâturage, carabes, micro-organismes) sont soit invisibles en grandes cultures soit à l'état de concept et de recherche active, avec une efficacité non encore prouvée véritablement à ce jour.

Tableau I : Analyse des alternatives au glyphosate par type d'usage : maturité technologique (TRL), faisabilité et efficacité à dire d'expert.

Analysis of alternative techniques by type of glyphosate using: technological maturity, feasibility and efficiency according to experts.

	Glyphosate	pureté spécifique des semences	Nettoyage du matériel (travail du sol,	broyage-élimination menues pailles (moiss.)	gestion des bord de champs et haies	compostage des fumiers	eau d'irrigation	rotation et espèces	choix variétal	date de semis	densité de semis	adaptation de la fertilisation	adaptation de l'irrigation	labour	déchaumage / faux semis	robots	roulage couvert et gel	paillage mulchage	méthode thermique	solarisation	méthode chimique biocontrôle	pâturage	carabes	micro-organisme (fonte de semis des adv.)	Herbicides (avec s.a. candidates)	Broyage des couverts															
Evaluation ITA : TRL	A	A	A	A	A	A	/	A	A	A	A	A	/	A	A	D-E	A	/	/	/	A-D	/	D	E	B	B-C															
Evaluation ITA : FAISABILITE	A	/	B	C	C	/	/	B-D	B	B-D	B	A-D	/	A-E	A-D	C-D	B-D	/	/	/	C-E	/	C	/	A	A-C															
Evaluation ITA : EFFICACITE	réf.	mesures prophylactiques						méthodes culturales						méthodes physique						méthode biologique		compléments proposés par les ITA GC																			
Vivaces dicotylédones	**	*	*	*	*	*	*	*	levier adapté à la réduction herbi en culture					**	**			non envisageable en GC									**														
Vivaces graminées	**	*	*	*	*	*	*	*						**	**																									**	
Interculture dicotylédones	**	*	*	*	*	(2)	*	*						** (3)	**													**	**			** (5)		** (6)						** (7)	
SD Interculture dicotylédones	**	*	*	*	*	(2)	*	*						** (3)	**																	** (5)		** (6)						** (7)	
Interculture graminées	**	*	*	*	(1)	(2)	*	*						** (3)	**												**	**				** (5)		** (6)							
SD Interculture graminées	**	*	*	*	(1)	(2)	*	*						** (3)	**																	** (5)		** (6)							
interculture couverts végétaux (détruire le couvert)	**																										**	**			** (4)		non envisageable en GC	non envisageable en GC	** (6)					**	**
SD interculture couvert végétaux (détruire le couvert)	**																														** (4)		non envisageable en GC	non envisageable en GC	** (6)					**	**
SD couvert permanent	**	*	*	*	(2)	*	*	*						** (3)	**																	** (5)		non envisageable en GC	non envisageable en GC	** (6)				**	**
Destruction des prairies	**																										**	**												**	**
régulation des couverts (usage jachère)	**																			** (6)						**	**														

* effet à terme ou bonne contribution au maintien d'un faible stock grainier
 ** effet sur l'année n, directement sur la culture quel que soit le niveau d'infestation
 (1) : ne fonctionne pas sur vulpin
 (2) : ne fonctionne que sur certaines flores. Ex : gaillet, brome, chardon-marie, amброisie
 (3) : plus réalisable et plus efficace en culture de printemps. Forte contrainte avant céréales. Impossible en colza
 (4) selon disponibilité des jours de gel, Efficace dans le Grand Nord-Est
 (5) : non pertinent en Grandes cultures
 (6) : contrainte économique (>300€/ha) et logistique (16 l/ha)
 (7) : seule l'addition de plusieurs substances actives permettrait de retrouver un spectre large mais inférieur au glyphosate

Code INRA à 3 lettres
Première lettre : Niveau de maturité technologique l'échelle TRL (Technology Readiness Level)
 A : déjà commercialisé
 B : ayant démontré son efficacité dans de nombreux cas
 C : méthode validé dans des conditions expé particulières
 D : preuve de concept fourni, phase de recherche active
 E : bas niveau, principes de bases
Deuxième lettre : efficacité de A efficace à E peu efficace.
Troisième lettre : facilité mise en œuvre
 A facile et économiquement viable à E méthode difficile à mettre en œuvre.

Code ITA
 A ou B vert clair
 Si un "C" Jaune
 Si un "D" Orange
 Si un "E" Rouge

Il existe 3 grands types d'usage du glyphosate pour lesquels il est nécessaire de trouver des alternatives et de les évaluer : 1) la destruction des adventices avant implantation de la culture voire en prélevée (suite à un faux semis ou non), c'est-à-dire « semer sur un sol propre » ; 2) la destruction des couverts végétaux, en particulier dans les systèmes sans labour ; 3) la maîtrise des vivaces (ou adventices difficiles). Pour ces usages nous expliquons ci-après comment la faisabilité et l'efficacité des alternatives envisagées (travail du sol principalement) sont dépendantes des conditions pédoclimatiques et comment elles peuvent parfois devenir, dans certains cas, une impasse. Enfin, les situations d'impasses telles que les systèmes en semis direct, le retournement des prairies et le désherbage des luzernes porte-graine sont explicitées.

1) Semer sur un sol propre : un exercice souvent délicat

Dans l'interculture longue, à la sortie de l'hiver et au début du printemps, il y a des adventices développées (reverdissements de labour, repousses ou non...), parfois encore des couverts, ainsi que des levées précoces d'adventices (faux-semis ou non) qu'il faut détruire pour semer la culture de printemps sur un sol propre. Le glyphosate permet une destruction efficace de toute cette végétation, sans retravailler retoucher le sol. Cette destruction est incontournable sur ambrosie, en particulier pour limiter les nouvelles levées dans le soja ou le tournesol (Duroueix et Vuillemin, 2016). En culture d'hiver et de printemps, cette molécule est un pivot de la gestion intégrée des graminées hivernales (ray-grass et vulpin).

Or, en l'absence de cet herbicide total, le travail du sol est actuellement la seule alternative : la multiplication des passages mécaniques, avec ou sans retournement, est donc souvent nécessaire pour assurer un sol propre et doit répondre aux autres objectifs : structure du sol, lit de semences adapté. Si contrairement aux systèmes en semis direct, cette solution reste envisageable, elle entraîne une augmentation des charges de mécanisation, du temps de travail, de la consommation en carburant et de fait, de rejet des gaz à effet de serre. Elle est déjà mise en œuvre par de nombreux agriculteurs qui travaillent déjà sans glyphosate à l'interculture (15% des surfaces sont traitées au glyphosate en grandes cultures (Service de la Statistique et de la Prospective, 2014), avec près de 30% avant tournesol contre moins de 15% avant blé tendre). La performance de ces systèmes passe avant tout par une lutte intégrée renforcée aboutissant à une pression des adventices modérée. On peut envisager le travail du sol avec ou sans charrue.

Le labour sera la solution la plus efficace notamment sur couverts, adventices développées, repousses de céréales et graminées, très difficiles à contrôler par un travail du sol sans retournement à cause de leur faculté à repiquer. Il permettra en plus d'avoir une efficacité sur le stock semencier de ces adventices. Cependant, la présence d'adventices après labour pendant l'hiver (mauvais retournement ou verdissement de labour) peut poser problème. Il est possible de détruire ces adventices lors de la reprise de labour mais l'efficacité du passage sera fortement tributaire des conditions météo, du type et du stade des adventices.

En non-labour, le travail du sol est plus délicat notamment sur les adventices développées. Le choix de l'outil sera important, bien qu'il ne permette pas de garantir une efficacité totale. En conditions sèches, il faut privilégier les outils permettant un déracinement des adventices, par exemple les outils à dents équipées de socs larges (Labreuche *et al.*, 2019) et travailler tôt pour éviter que les adventices ne soient trop développées. Le travail du sol est plus difficile, voire néfaste, dans certaines conditions pédoclimatiques : les conditions plus humides en fin d'automne ou à la reprise de végétation, les sols argileux, les sols superficiels ou caillouteux, les sols hydromorphes et les sols en pente avec un risque élevé d'érosion. La nécessité de passages répétés n'est pas à exclure.

a) En sols argileux et en interculture longue, le travail du sol avant semis, réalisé dans les conditions humides du printemps, risque d'endommager la qualité du lit de semences (altération des bénéfiques de l'hiver comme les alternances de gel-dégel et d'humectation-dessiccation par la génération de mottes). Cela affecte aussi la structure du sol (compaction liée à un passage supplémentaire, semelle de travail liée à un passage de herse rotative en conditions humides). Par conséquent, cela peut compromettre la réussite de la culture de printemps (le tournesol et le sorgho sont particulièrement sensibles à la qualité du lit de semences). Certaines années on peut également se retrouver dans des impasses techniques. C'est pourquoi, en sols argileux, il vaut mieux envisager un travail du sol précoce ; en particulier lorsqu'un tournesol est prévu. Dès que les adventices commencent à être développées et que l'état du sol permet une intervention, saisir l'opportunité des créneaux utilisables ; en effet, plus on intervient tôt (et dans des conditions correctes) sur des plantes jeunes et mieux on les détruit. Dans certains scénarios de printemps pluvieux, l'attente de conditions optimales pour la destruction

mécanique des jeunes adventices difficiles à contrôler en culture peut générer des retards de date de semis qui peuvent impacter le potentiel de rendement de la culture.

b) En sols hydromorphes ou climats humides en sortie hiver et printemps, il est difficile de réaliser des interventions de travail du sol car les conditions hydriques du sol ne permettent pas les interventions mécaniques (portance du sol), obligeant parfois à semer sur un sol non propre. Ces sols sont très sensibles au développement de croûtes de battance, qui peuvent entraîner des soucis de développement des cultures. En présence d'une croûte de battance, il est conseillé d'intervenir le plus tard possible. La houe rotative pour éliminer les jeunes levées des faux-semis et écroûter sera très utile dans ces situations.

c) Dans les sols en forte pente, l'augmentation des interventions mécaniques se traduit par une augmentation du risque d'érosion.

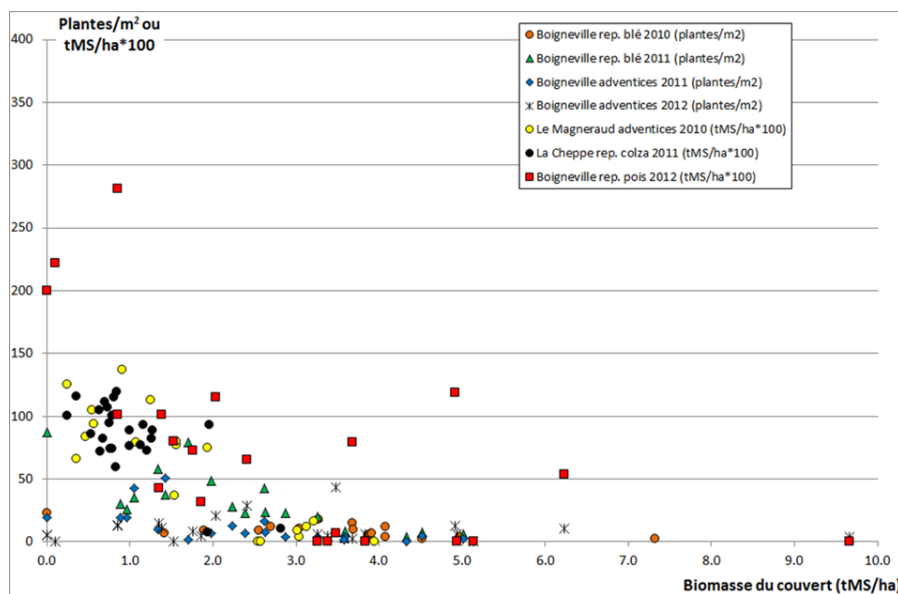
Enfin, il faut noter que ce travail du sol de substitution présente une efficacité plus aléatoire et plus dépendante des conditions pédoclimatiques. En effet, en fin d'hiver – printemps les fenêtres d'intervention ne sont pas toujours au rendez-vous et en fin d'été – début automne, le travail du sol peut entraîner un dessèchement du profil qui dégrade la qualité d'implantation de la culture et donc le rendement futur.

2) Détruire les couverts : pas si simple en non labour

Un couvert entre en compétition avec les adventices ou les repousses du précédent. La compétition pour la lumière semble être le principal facteur limitant en jeu. Sur le terrain, on constate souvent que le développement des adventices et des repousses est d'autant plus faible que le couvert produit rapidement des biomasses élevées (figure 1). Une biomasse de 3 tonnes de matière sèche à l'hectare commence à avoir un effet significatif sur le salissement de la parcelle, sans pour autant être parfait. Les couverts capables de produire cette biomasse et de couvrir le sol rapidement sont souvent des crucifères.

Figure 1 : Impact de la biomasse du couvert sur le nombre de repousses et d'adventices ou la biomasse de ces repousses ou adventices. Cinq essais réalisés à Boigneville (91), au Magneraud (17) et à la Cheppe (51) les automnes 2010, 2011 et 2012.

Effect of covercrop biomass on biomass and emergences of weeds and crops regrowth. Five field trials Boigneville (91), Magneraud (17), la Cheppe (51), autumn 2010, 2011 and 2012.



La présence de couverts modifie la gestion de l'interculture et, notamment, les périodes de travail du sol. La destruction automnale ou hivernale du couvert (et des adventices ou repousses qui peuvent pousser en dessous) pose question. En effet, en l'absence de labour, cette période humide n'est pas propice à la destruction de certaines plantes par dessèchement comme cela peut être le cas en été ou début d'automne. Le mode de destruction du couvert doit prendre en compte l'espèce de couvert, car chacune a sa propre sensibilité aux différents moyens de destruction (tableau II). Le développement du couvert intervient également : s'il est bien développé (stade, biomasse), il est paradoxalement plus facile à détruire, que ce soit par le gel, le roulage, un travail superficiel, voire un broyage. Les graminées (couvert, repousses ou adventices) au stade tallage ou début montaison ont une forte propension à repousser après un roulage, un broyage - ou même un pâturage, comme cela se pratique de plus en plus ; même un déchaumage est moyennement efficace si le temps n'est pas séchant. Dans le choix des couverts il convient d'éviter graminées et radis fourragers difficiles à détruire sans labour et sans glyphosate.

Tableau II : Sensibilité des espèces de couverts à différents modes de destruction.

Sensitivity of cover crops to different types of destruction

	Gel	Rouleau lourd sur gel	Broyage, Rolofaca, Rouleau hacheur	Labour	Déchaumage	Glyphosate
Niger, Tournesol, Sarrasin	0 à -4°C	++++	+++	++++	+++	+++
Moutarde blanche	-5 à -10°C	+++	++++	(+ broyage)	(+ broyage)	+++
Phacélie	-5 à -13°C	++++	+++	++++	+++	+++
Vesce, Féverole (floraison)	-5 à -10°C	+++	++/+++ selon hauteur	++++	+++	+++
Céréale (épiée)	-5 à -10°C	+++	+++	+++	+++	++++
Seigle, Ray-grass (tallage)	<-15°C	+	+	+++	++	+++
Radis fourrager (rosette)	-8 à -15°C	++	+	++	++	++

Légende : ++++ Très sensible, +++ Sensible, ++ Assez sensible, + Peu sensible

Legend : ++++ very susceptible, +++ susceptible, ++medium susceptible, + low susceptible

3) Maîtrise des vivaces : très complexe

Une espèce vivace se définit par son aptitude à se régénérer à partir d'un fragment de l'individu (tiges, racines, feuilles, bulbes...). Cette capacité lui confère une extraordinaire plasticité et résilience qui lui permettent de coloniser tous les milieux sans passer nécessairement par une phase de multiplication sexuée. En grandes cultures, dans les systèmes traditionnels, les pluriannuelles et vivaces représentent qualitativement 15% à 20 % de la flore adventice. Cette proportion peut très fortement augmenter en l'absence de travail du sol et/ou l'intégration de couverts d'interculture. Actuellement seuls les herbicides systémiques (dont le glyphosate) permettent de contenir la pression « vivaces » y compris dans les systèmes simplifiés. Preuve en est les difficultés récurrentes de maîtrise des rumex (*Rumex crispus* et *R. obtusifolius*), chardon des champs (*Cirsium arvense*) ou chiendent rampant (*Elytrigia repens*) dans les systèmes céréaliers biologiques. La lutte mécanique ne peut compenser à elle seule la suppression du glyphosate car les formes de multiplication sont aussi variées dans leur forme que dans leur position au niveau du sol. A l'image du chiendent pied-de-poule (*Cynodon dactylon*), la lutte doit se mener aussi bien en surface (stolons) qu'en profondeur (rhizomes). Les pratiques culturales ont un effet majeur sur le développement de ces espèces : citons la suppression ou la réduction de la lutte dans l'interculture, la simplification du travail du sol, les rotations incluant des cultures pérennes (certaines porte-graines et fourragères) ou la combinaison d'une monoculture et de la suppression du travail du sol. Pour les espèces à rhizomes ou drageons le labour retarde voire perturbe leur développement mais il n'est pas suffisant et ne saura, la plupart du temps, se substituer à un

traitement herbicide systémique (Labreuche *et al.*, 2019). Pour les espèces à rosettes et /ou stolons les façons superficielles après récolte seront généralement suffisantes. S'il est des situations où les herbicides (y compris le glyphosate) sont réellement irremplaçables, la lutte contre les vivaces en est, sans aucun doute, une (Labreuche *et al.*, 2019).

4) Les systèmes en semis direct sous couvert : aucune solution à ce jour

Le travail du sol devenant indispensable en l'absence du glyphosate, les systèmes en non-travail du sol strict, dits aussi en « agriculture de conservation des sols (ACS) », n'ont pas de solution pour se passer du glyphosate et se retrouvent donc dans une impasse (Reboud *et al.*, 2017).

En effet, aujourd'hui il n'existe pas d'autres herbicides équivalents au glyphosate en termes de polyvalence et d'efficacité (Chauvel *et al.*, 2012 ; ICTA, 2017), à moins de combiner plusieurs molécules, avec potentiellement un impact écotoxicologique plus lourd. En effet, les alternatives chimiques sur dicotylédones (Banvel et 2-4 D par exemple) ont des profils toxicologiques et écotoxicologiques moins favorables et une persistance dans le sol qui rend l'utilisation du produit incompatible avec la plupart des cultures dicotylédones telles que les légumineuses, le colza et le tournesol (ICTA, 2017).

L'agriculture de conservation des sols est régie par des enjeux environnementaux tels que la fertilité des sols et les problématiques d'érosion, la consommation de gazole, l'émission des gaz à effet de serre et la séquestration du carbone, la biodiversité... Les agriculteurs en systèmes de conservation des sols choisissent de ne pas travailler le sol pour perturber le moins possible l'activité biologique de celui-ci, favoriser la porosité naturelle et augmenter le taux de matière organique en surface. L'arrêt du travail du sol est favorable à la biodiversité (Brévault *et al.*, 2007 ; Zuber et Villamil, 2016 ; Bowles *et al.*, 2017 ; Briones et Schmidt, 2017). Ces systèmes se basent aussi beaucoup sur la couverture permanente des sols, ce qui implique le maintien des résidus de culture en surface et l'implantation de couverts végétaux pendant l'interculture ou sous couverts de la culture avant la récolte pour structurer le sol (réseau racinaire) et favoriser la biodiversité aérienne et souterraine. La gestion de ces couverts, et en particulier leur destruction, peut être parfois complexe en l'absence du glyphosate (cf partie 2 sur les couverts).

Ainsi, les agriculteurs en ACS, malgré les bénéfices environnementaux qu'ils recherchent et retirent de ces systèmes de culture, sont dépendants du glyphosate et seront donc les plus en difficulté lors du retrait de la molécule.

5) Autres impasses : retournement prairies, désherbage des luzernes porte-graine... (ICTA, 2017)

En termes de destruction des prairies, le labour est une solution pour se passer du glyphosate pour une partie des hectares concernés, or il existe des exploitations où les agriculteurs ne souhaitent pas y avoir recours (technique culturale simplifiée, travail profond exclu...), mais surtout des contextes où il n'est pas réalisable : sols peu profonds, très caillouteux, à forte teneur en argile, en pente ou encore très hydromorphes. Il est alors, qu'il s'agisse d'espèces prairiales pérennes ou annuelles, très difficile de détruire correctement une prairie, les interventions mécaniques possibles ou non selon le contexte pédo-climatiques doivent être plus nombreuses, pour un résultat moins certain et souvent fortement dépendant des conditions climatiques qui suivent la destruction.

En culture de porte-graine, le glyphosate est utilisé en début de repos végétatif de la luzerne installée (plus d'un an) pour lutter efficacement contre l'ensemble des adventices présentes, notamment helminthie (*Picris echioides*), laitersons (*Sonchus* sp.) et rumex (*Rumex* sp.). A l'heure actuelle, c'est la seule solution efficace pour gérer ces adventices souvent développées. Il est également utilisé à petite dose (110 à 125 g/ha) en trèfle violet porte-graine pour lutter contre la petite orobanche (*Orobanche minor*). Pour la gestion de cette plante parasite il est aussi possible d'utiliser une spécialité herbicide à base d'imazamox et pendiméthaline mais l'efficacité de ces deux produits n'est pas totale.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Performances des alternatives au glyphosate

L'analyse approfondie des alternatives au glyphosate à partir du tableau I nous révèle finalement que beaucoup de techniques alternatives envisagées concernent majoritairement la gestion intégrée des adventices en général aux dépens de la substitution simple du glyphosate. Le sujet est donc plus complexe qu'il n'y paraît.

En interculture, la mise en place de solutions mécaniques alternatives au glyphosate augmente la dépendance du système aux conditions météorologiques (pluviométrie et état hydrique du sol) avec des disparités selon le type de sol. Envisager une substitution du glyphosate en interculture c'est accepter des scénarios plus risqués. Tout échec ou impasse d'une solution alternative peut impacter défavorablement une situation stabilisée et se traduire par une augmentation du recours aux herbicides en culture et une détérioration de la pression des adventices. De plus, en l'absence de labour, les techniques culturales simplifiées utilisent davantage d'herbicides que les systèmes en labour (Cordeau *et al.*, 2016 ; Quinio *et al.*, 2017).

Une substitution du glyphosate sera aisée en situation où cette pression est faible, c'est-à-dire un stock grainier le plus bas possible. Pour cela, l'approche de lutte intégrée est incontournable et des changements plus profonds sont à envisager au sein du système de culture. Le choix des cultures de la succession culturale et l'allongement de la rotation sont des leviers incontournables (Vacher *et al.*, 2019). Le recours au labour est, par exemple, une option sérieuse. Cependant, la substitution du glyphosate par le travail du sol n'est pas compatible avec les principes du semis direct ; cette situation est à ce jour une réelle impasse quant au plan de sortie du glyphosate.

La conciliation de la gestion des adventices (graminées hivernales en particulier) en interculture avec la mise en place de couverts végétaux devrait se complexifier, notamment pour respecter les critères de la directive nitrates (type de couvert, date de destruction, etc...) et en l'absence de labour. L'absence de recours au glyphosate oblige à revoir les objectifs du couvert : plus étouffant (limiter le développement des adventices), plus gélif et donc plus facile à détruire. Le travail du sol sera probablement à revoir (date du faux semis, de l'implantation du couvert, de sa destruction) et la construction du 7ème programme d'action de la directive nitrates devra intégrer ces nouvelles contraintes.

La gestion des vivaces et des espèces particulières telle que l'ambrosie à feuille d'armoise est un autre point sensible. En absence de glyphosate, on assigne au travail du sol des objectifs parfois très spécifiques (par exemple pour la gestion du chiendent ou du chardon des champs) pas toujours conciliables avec les autres éléments de la conduite (gestion des annuelles, couverts végétaux, préparation du lit de semences). Une alternative chimique reste envisageable contre les dicotylédones. Ce n'est pas le cas pour la gestion des graminées vivaces se trouvant ainsi dans une impasse.

Trajectoires d'évolution

La mise en place d'alternatives s'inscrit dans une trajectoire, plus ou moins longue en fonction de l'état initial de la pression des adventices, de l'anticipation et de la technicité mises en œuvre. L'agronomie sera plus présente dans l'accompagnement des producteurs.

Enfin, parmi les principales conséquences du remplacement du glyphosate par des leviers alternatifs nous constatons une augmentation significative du temps de travail et une augmentation des émissions de gaz à effet de serre, contraire aux objectifs du paquet énergie-climat (Dessienne, 2019). La nécessité de modifier une partie du parc matériel se fait souvent ressentir (par exemple investissement d'une charrue ou d'un rouleau hacheur pour les couverts), ce qui se traduit par une

augmentation significative des charges de mécanisation (Dessienne, 2019). Ces différents éléments impactent négativement la marge nette via l'augmentation des charges de mécanisation principalement. En cas de mauvais contrôle des adventices par ces leviers alternatifs, la gestion des adventices à la rotation peut s'avérer plus difficile provoquant un impact négatif sur les rendements des cultures, ce qui se répercuterait sur le produit brut et sur la marge nette également.

La substitution du glyphosate et la résistance des adventices aux herbicides

Le déploiement d'une technique alternative à l'utilisation d'une même famille chimique d'herbicide reste le pivot de la gestion du risque de résistance. Le recours au glyphosate en interculture fait partie des leviers jusqu'ici conseillés (Vacher *et al.*, 2019). Substituer le glyphosate par un passage d'outil visant à détruire les adventices présentera les mêmes bénéfices à condition que cette alternative soit tout aussi efficace et régulière. Les échecs susceptibles de se produire, par exemple en cas de conditions météorologiques défavorables à la destruction des graminées avant semis, pourraient cependant fragiliser des situations jusqu'ici maîtrisées.

Qualité des sols

Les techniques de conservation des sols et l'utilisation des herbicides totaux sont fortement liés. Le plan de sortie du glyphosate pourrait complètement remettre en question les techniques de semis direct dont l'une des motivations premières est la lutte contre l'érosion hydrique (INRA, 2017). En systèmes plus conventionnels, la gestion des adventices par un ou plusieurs passages d'outils supplémentaires devrait augmenter l'exposition des sols à l'érosion hivernale (gestion des reverdissements hivernaux, contre graminées notamment) et surtout estivale. Le travail du sol contre le reverdissement des chaumes (lutte contre l'ambrosie et autres dicotylédones printanières) expose en effet les coteaux aux épisodes orageux du mois de juillet, particulièrement érosifs. La ré-introduction du labour sensibilise également les sols à ce phénomène auquel s'ajoute, en forte pente, un entrainement mécanique (Rouaud, 1987). Enfin, les passages supplémentaires d'outils en conditions humides se traduisent par une compaction du sol. C'est le risque pour une gestion des levées d'adventices notamment en interculture longue (destruction avant hiver, durant l'hiver ou au printemps avant semis).

Les techniques alternatives innovantes

Enfin, il existe d'autres techniques de destruction des adventices, beaucoup plus prospectives. Le désherbage thermique à la flamme ou à l'eau chaude, le jet d'eau haute pression et le désherbage électrique sont des techniques en cours d'étude dans les instituts (Labreuche *et al.*, 2019). L'évaluation doit cependant être multi-critères : performances, effets non intentionnels (incidence sur la faune et la microfaune pour le désherbage électrique) et impacts économiques (débit de chantier, coûts) ou énergétique. A ce jour, ces nouvelles techniques paraissent peu accessibles et se destineraient plutôt au désherbage des zones non agricoles ou des cultures spécialisées.

Dans le but d'étudier les alternatives au glyphosate et caractériser les situations dans lesquelles elles sont réalisables et satisfaisantes, le projet Ecophyto II+ du nom de « AGATE GC » (Alternatives au Glyphosate en Grandes Cultures) a vu le jour. Il réunit les instituts techniques des grandes cultures (ACTA, Arvalis, Terres Inovia, ITB) et la Chambre Régionale d'Agriculture d'Occitanie et permettra d'avancer sur ce sujet et d'ouvrir de nouvelles perspectives.

BIBLIOGRAPHIE

Acta, 2019 - Index acta phytosanitaire. Acta éditions, 1051 p.

Ambolet B., Bernard J.L., Décor J.P., Fougereux A. et Gasquez J., 2017. Les services rendus par le glyphosate en agriculture. Note académique de l'Académie d'Agriculture de France.

Bowles T. M., Jackson L. E., Loeher M. & Cavagnaro T. R., 2017. Ecological intensification and arbuscular mycorrhizas: a meta-analysis of tillage and cover crop effects. *Journal of Applied Ecology*, 54(6), 1785-1793.

Brévault T., Bikay S., Maldès J. M. & Naudin K., 2007. Impact of a no-till with mulch soil management strategy on soil macrofauna communities in a cotton cropping system. *Soil and Tillage Research*, 97(2), 140-149.

Briones M. J. I. & Schmidt O., 2017. Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Global Change Biology*, 23(10), 4396-4419.

Chauvel B., Guillemain J-P., Gasquez J., Gauvrit C., 2012 - History of chemical weeding from 1944 to 2011 in France: changes and evolution of herbicide molecules. *Crop Protection* 42, 320-326.

Citron G., Rameau C., Simon C. et Orlando D., 1995. Modalités d'entretien des jachères semées, par voie chimique. 16^{ème} conférence du COLUMA. 6-7-8 décembre 1995, Reims.

Cordeau S., Dessaint F., Quinio M., De Waele M., Biju-Duval L., Buthiot M., Cadet E., Guillemain J-P., 2016 - Analyse des effets direct et indirect des pratiques agricoles sur les adventices et la production agricoles de blé tendre d'hiver. In: AFPP-23ème conférence du COLUMA, journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. Dijon, 6, 7 et 8 décembre 2016.

Decoin M., 2016 - Glyphosate : ce qu'en disent le Circ, l'Efsa et l'Anses. *Phytoma*, 694, 10-14.

DEPHY Fermes, 2018 - Le glyphosate dans le réseau DEPHY Ferme. ECOPHYTO, 60 p.

Dessienne, 2019. Gestion de l'interculture dans des rotations de grandes cultures : évaluation multicritères de solutions alternatives à l'utilisation du glyphosate. [Mémoire Fin d'Etudes, ARVALIS Institut du végétal, 2019].

Duroueix F., Vuillemin F., 2016. Gérer le risque de résistance de l'ambrosie à feuille d'armoise (*Ambrosia artemisiifolia* L.) aux inhibiteurs de l'ALS en culture de tournesol et de soja. AFPP-23ème conférence du COLUMA, journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. Dijon, 6, 7 et 8 décembre 2016.

ICTA, 2017 - Les Instituts techniques agricoles et le glyphosate, 42 p.

INRA, 2017. L'agriculture de conservation : faut-il labourer le sol. 2014 et mise à jour 2017. <http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Agroecologie/Tous-les-dossiers/L-agriculture-de-conservation>

Labreuche J., Perriot B., Gautellier Vizios L., Brun D., Bonin L., Duroueix F., Vuillemin F., Duval R., Royer D., Buridant C., Rodriguez A., 2019. Glyphosate, peut-on s'en passer et avec quelles conséquences ? *Perspectives Agricoles* n°468 Juillet-août 2019, p 41-48.

Quinio M., De Waele M., Dessaint F., Biju-Duval L., Buthiot M., Cadet E., Bybee-Finley AK., Guillemain J-P., Cordeau S., 2017 - Separating the confounding effects of farming practices on weeds and winter wheat production using path modelling. *European Journal of Agronomy* 82, 134-143.

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

Rouaud M., 1987. - Evaluation de l'érosion quaternaire, des remaniements de versant et de l'érosion en rigole dans le Terrefort toulousain. Thèse 3' cycle, Univ. Toulouse III, 320 p.

Sebillotte M., 1969. Les modifications des assolements et rotations liées à l'emploi des herbicides. FNGPC – COLUMA. Colloque Herbicides et Techniques de Culture, Versailles, 11-12 février 1969.

SERVICE DE LA STATISTIQUE ET DE LA PROSPECTIVE, 2014. Enquête sur les pratiques phytosanitaires en grandes cultures 2014. S.I.

Vacher C., Vuillemin F, Buridant C., Denieul C, Délye C, Duroueix F., Perriot B., Rodriguez A., Royer C., Bonin L., 2019. Note commune inter-instituts 2019. Pour la gestion des résistances des adventices aux herbicides en grandes cultures.

Zuber S. M. & Villamil M. B., 2016. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*, 97, 176-187.