

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

SYNTHESE DES ESSAIS DE TECHNIQUES ALTERNATIVES POUR LE DESHERBAGE DU MAÏS

M.Boissières¹, D.Leclercq¹, V.Bibard², L.Jouy³.

^{1, 2, 3} ARVALIS-Institut du végétal – ¹45 Voie Romaine, 41240 Beauce-la-Romaine – ²21 Chemin de Pau, 64121 Montardon –

³Station expérimentale, 91720 Boigneville

RESUME : Les enjeux actuels de l'agroécologie reposent en partie sur une moindre dépendance de la production agricole aux intrants chimiques. Dans l'itinéraire technique de production du maïs, la lutte contre les mauvaises herbes est incontournable et c'est aujourd'hui l'un des postes qui repose le plus sur la chimie. Or, le maïs est une culture dont l'écartement entre rangs permet d'envisager différentes stratégies de désherbage faisant appel à des techniques alternatives visant à réduire cette dépendance. Depuis près de quinze ans, ARVALIS Institut du végétal et de nombreux partenaires régionaux réalisent des essais afin d'évaluer et de comparer des stratégies de désherbage faisant intervenir plusieurs approches chimiques et/ou mécaniques. Après avoir caractérisé les principaux facteurs d'efficacité et de faisabilité des techniques utilisées, nous proposons d'effectuer une synthèse pluriannuelle de ces essais en comparant quelques stratégies de désherbage allant du tout chimique au tout mécanique en passant par des combinaisons chimique + mécanique. Cette comparaison repose sur plusieurs critères dont l'efficacité du désherbage, la faisabilité des techniques utilisées ainsi qu'une approche technico-économique de leur mise en œuvre.

Mots clés :

Maïs, désherbage, désherbage mécanique, technique alternative, réduction produits phytosanitaires

SUMMARY : Current issues of agroecology are partly based on less dependence of agricultural production on chemical inputs. On technical itinerary of corn production, weed control is unavoidable and it is now one of the most depend of chemical. However, maize is a crop whose row spacing allows to consider different weeding strategies using alternative techniques to reduce this reliance. Since nearly fifteen years, ARVALIS Institut du végétal and many regional partners have been conducted tests to evaluate and compare weeding strategies involving several chemical and / or mechanical approaches. After having characterized the main factors of efficiency and feasibility of the techniques used, we propose a multi-year synthesis of these trials by comparing some weed control strategies going from whole chemical to whole mechanical and by chemical + mechanical combinations. This comparison is based on several criteria including effectiveness of weeding, feasibility of the techniques used as well as a techno-economic approach to their implementation.

Keys words :

Maize, weeding, mechanical weeding, alternative technical, phytosanitary reduction

Remerciements pour les collègues de l'Institut ayant participé à la rédaction de cet article : *E.Baranger, M.Moquet, R.Doucet, B.Perriot, D.Brun, M.Berrodier.*

Avec les remerciements également d'ARVALIS pour les différentes structures partenaires CA 03, CA 14, CA 23, CA 27, CA 28, CA 36, CA 37, CA 41, CA 45, CA 50, CA 53, CA 56, CA 58, CA 61, CA 63, CA 72, CA 76, CA 85, CA IDF, CRAB, FDGEDA 18, LEGTA, LIMAGRAIN, UCATA et l'ensemble des agriculteurs contributeurs.

INTRODUCTION : Au moment où semble se cristalliser un débat sur les intrants en agriculture, où l'on parle même de "bas intrants (low-input)", ARVALIS-Institut du végétal peut apporter une contribution utile à partir de ses études pilotées sur la culture du maïs. D'abord, un fait : par l'innovation, la modération des agriculteurs, les contraintes économiques et réglementaires, on observe depuis 20 ans une tendance à la baisse d'utilisation des quantités de substances actives synthétiques utilisées pour protéger la culture du maïs (Urruty *N. et al.*, 2015). Ensuite, le maïs est une plante semée avec un interligne large qui permet des interventions mécaniques notamment en désherbage. C'est la raison pour laquelle des travaux sur des solutions alternatives, telles que le désherbage mécanique, ont été

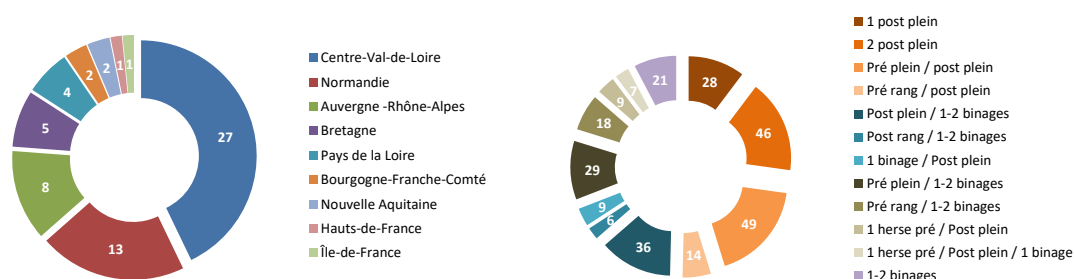
entrepris. D'autres solutions alternatives comme le désherbage chimique localisé sur le rang de semis existent et certaines sont d'ores et déjà mises en œuvre. Si leur développement reste limité, c'est souvent parce que ces solutions alternatives sont parfois contraignantes, onéreuses, moins souples d'utilisation et plus aléatoires dans leurs performances que les solutions chimiques appliquées en plein. Solutions qui par ailleurs ont aussi fait d'importants progrès en matière de précision ces dernières années.

Les agriculteurs auront besoin demain d'une panoplie de solutions adaptées à chaque territoire, chaque parcelle. On recherche alors des solutions utilisant moins de produits phytosanitaires en vérifiant leur faisabilité, avec quel coût économique, quel impact sur l'environnement, etc. Aujourd'hui ARVALIS-Institut du végétal développe une approche segmentée de la conduite d'une culture de maïs qui vise à adapter les intrants aux objectifs et niveaux de rendement potentiel.

ORIGINE ET METHODE D'ACQUISITION DES REFERENCES

ARVALIS-Institut du végétal teste et évalue toutes les solutions possibles pour proposer les plus pertinentes et les plus robustes aux producteurs en fonction de leurs conditions de production. Une base de données a pu être constituée à partir de 63 essais sur près de 15 ans de travaux, réalisés avec de nombreux partenaires tels que des chambres d'agriculture et des organismes de développement et de distribution (coopératives agricoles, semenciers...) en région Centre, Ile de France, Auvergne, Limousin ainsi que dans le grand Ouest. Cette base de données rassemble des références sur près de 45 modalités de désherbage du maïs mettant en œuvre des techniques chimiques, mixtes ou mécaniques. Nous vous proposons d'en extraire 12 modalités, les plus représentatives, issues des 63 essais s'attachant à décrire un panorama complet des possibilités (Figure 1 et 2).

Figure 1 et 2 : Répartition géographique des 63 essais (gauche) et nombre d'essais par modalité étudiée (droite)
Geographical distribution of 63 test use in this synthesis (left) and test distribution per modality (right)



Les premiers essais remontent à 2005, date à laquelle les techniques de désherbage mécanique et mixte ont commencé à être testées dans nos réseaux, afin de répondre à une réduction de l'offre phytosanitaire (retrait de produits, réductions des doses,...). Depuis 2009 sont menés des essais avec des traitements chimiques localisés sur le rang de maïs. Cette technique vient en réponse aux évolutions technologiques du matériel (buses, senseurs de hauteur de rampe...) et à l'amélioration de la précision du guidage par GPS. Que ce soit avec un positionnement en prélevée ou post-levée de la culture, la réduction de la quantité de produit épandu est de l'ordre de 70%. Ces stratégies répondent donc directement à l'objectif de réduction des intrants et constituent d'autres alternatives au désherbage conventionnel.

Il faut noter que les stratégies conventionnelles, servant de références, sont les plus testées depuis 2005. Ce qui permet d'avoir un nombre de références assez conséquent. Les modalités introduites par la suite comme pistes de progrès (sur le rang, herse étrille,...) sont présentes dans moins d'essais (Figure 2). Comparer des modalités avec un nombre de références différent introduit un biais lié à la variabilité des conditions de mise en œuvre. De plus, les techniques testées par le réseau ont évolué au fil des années, ce qui, en 15 ans génère une autre source de variabilité. Par conséquent l'analyse

tirée de cette synthèse permet de dégager des tendances et non des conclusions extrapolables à tout type de situation.

Les programmes chimiques présentés le sont à titre d'exemple pour illustrer chaque type de stratégies (Tableau 1 et Figure 2). La « post-levée en plein » et la « Pré-levée puis Post-levée en plein » serviront de références, puisque ces stratégies représentent à elles-seules 70% des programmes conventionnels de désherbage chimique du maïs. Sept stratégies représentatives des différentes possibilités dites « mixtes » seront présentées. Enfin, pour les stratégies « tout mécanique », seul le binage est étudié car il s'agit de la technique la plus représentative.

Tableau I : Les différentes stratégies étudiées
The various weeding strategies

	Exemple de programme (dose en l/ha ou PC l /ha)
Tout chimique	
1 Post en plein	ex : nicosulfuron 0.5 + mesotrione 0.5 + dicamba 0.2
2 Post en plein	ex : (nicosulfuron 0.5 + mesotrione 0.5 + dicamba 0.2) x2
Pré plein / Post plein	ex : acétochlore 3.5 puis mesotrione 0.5
Pré rang / post plein	ex : acétochlore 3.5 sur 30% de la surface puis mesotrione 0.5
Mixte tout en post	
Post plein / 1-2 Binages	ex : nicosulfuron 0.5 + mesotrione 0.5 puis 1 à 2 binages
Post rang / 1-2 Binages	ex : nicosulfuron 0.5 + mesotrione 0.5 sur 30% de la surface puis 1 à 2 binages
1 Binage post / post plein	ex : 1 binage puis nicosulfuron 0.5 + mesotrione 0.5
Mixte pré/Post	
Pré plein / 1-2 binages	ex : acétochlore 3.5 puis 1 à 2 binages
Pré rang / 1-2 binages	ex : acétochlore 3.5 sur 30% de la surface puis 1 à 2 binages
1 Herse pré / Post en plein	ex : Herse étrille puis nicosulfuron 0.5 + mesotrione 0.5
1 Herse pré / Post en plein / 1 binage	ex : Herse étrille puis nicosulfuron 0.5 + mesotrione 0.5 puis 1 à 2 binages
Tout mécanique	
1-2 Binages	

Pour effectuer cette synthèse des informations disponibles au sujet des techniques alternatives, des stratégies « tout chimique » seront comparées à des stratégies dites de désherbage « mixte ». Dans ces stratégies s'y retrouvent celles avec un positionnement « tout en post-levée » et celle en « prélevée puis post-levée ». La comparaison entre le traitement en plein et le traitement localisé sur le rang sera aussi étudiée.

Une autre information utilisée dans cette synthèse est la flore majoritaire présente dans les essais. Les espèces rencontrées sur les 63 essais ont pu être regroupées en trois catégories décrites dans le tableau II : les dicotylédones classiques du maïs, les dicotylédones fréquentes plus difficiles à contrôler et les graminées estivales auxquelles s'ajoutent le ray-grass et le vulpin, deux espèces de graminées particulièrement représentées sur ces essais.

Tableau II : Catégories d'adventices étudiées
The various weed

Dicotylédones classiques	Les amarantes (<i>Amaranthus</i> sp.) ; le chénopode blanc (<i>Chenopodium album</i> L.) ; la morelle noire (<i>Solanum nigrum</i>) ; la renouée persicaire (<i>Persicaria maculosa</i>) ou feuille de patience (<i>Persicaria lapathifolia</i>).
Dicotylédones fréquentes	L'ambrosie trifide (<i>Ambrosia trifida</i>) et l'ambrosie à feuille d'amoise (<i>A. artemisiifolia</i> L.) ; l'arroche étalée (<i>Atriplex patula</i>) ; le Chénopode hybride (<i>C. hybridum</i>) et polysperme (<i>C. polyspermum</i>) ; le datura stramoine (<i>Datura stramonium</i>) ; la mercuriale annuelle (<i>Mercurialis annua</i> L.) ; le mouron des oiseaux ou stellaire intermédiaire (<i>Stellaria media</i> L.) ; la renouée liseron (<i>Fallopia convolvulus</i>) et la renouée des oiseaux (<i>Polygonum aviculare</i>) ; les véroniques (<i>Veronica</i> sp.)
Graminées	Les digitaires (<i>Digitaria</i>), sanguine (<i>D. sanguinalis</i>), filiforme ou ischème (<i>D. ischaemum</i>) ; le ray-grass (<i>Lolium perenne</i> sp.) ; le vulpin des champs (<i>Alopecurus myosuroides</i>) ; les panics (<i>Panicum</i>), pied de coq (<i>Echinochloa crus-galli</i>), capillaire (<i>P. capillare</i> L.), dichotome (<i>P. dichotomiflorum</i> Michaux), faux millet (<i>P. miliaceum</i> L.) ; les sétaires (<i>Sétaria</i>), glauque (<i>S. pumila</i>), verte (<i>S. viridis</i> subsp. <i>viridis</i>), verticillée (<i>S. verticillata</i> , d'Italie (<i>S. italica</i>)).

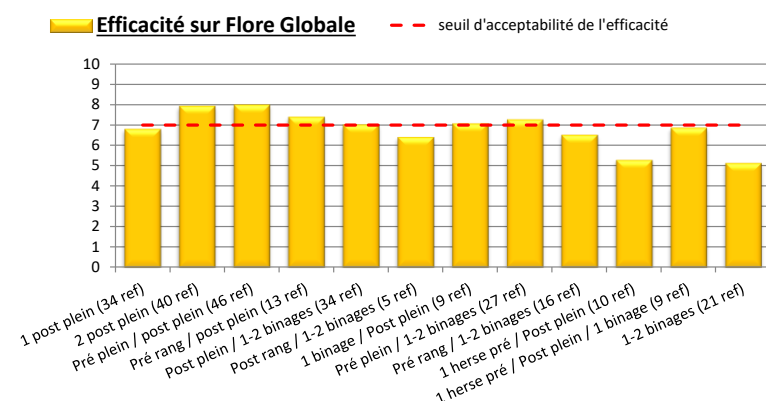
RESULTATS ET SYNTHESE

Afin d'effectuer une comparaison aussi objective que possible, différents critères ont été retenus. Rappelons que l'objectif principal du désherbage est de préserver le potentiel de la culture, ce qui consiste d'abord à limiter la concurrence des adventices sur le maïs, principalement de son

implantation jusqu'au recouvrement de l'inter-rang, période de forte concurrence vis-à-vis de la lumière et des éléments nutritifs. Les différents critères présentés ci-après sont évalués, pour chaque stratégie, dans des conditions optimales de positionnement par rapport au stade des adventices, au stade de la culture et au contexte climatique. L'efficacité sera abordée à différents niveaux de précision, en allant de l'efficacité globale qui porte sur l'ensemble de la flore et représente la satisfaction du désherbage pour l'agriculteur, à l'efficacité sur la flore spécifique, permettant de caractériser le comportement des différentes stratégies sur chaque catégorie d'adventice en passant par la différenciation de l'efficacité sur le rang de maïs de celle observée dans l'inter-rang. S'en suivront des analyses de faisabilité technique et une approche économique des différentes stratégies.

Le premier critère reste *l'efficacité* sur les adventices. Cette notion d'efficacité doit tenir compte de la satisfaction globale du programme, de son efficience sur le rang et l'inter-rang et sur les différents types de flore. Il est considéré qu'une stratégie est efficace si elle est très proche ou dépasse la note de 7. Cette note caractérise un désherbage acceptable, non nuisible pour la culture et non préjudiciable pour la valeur patrimoniale de la parcelle, c'est-à-dire que selon les espèces, 95% à 97% des adventices ont été éliminées.

Figure 3 : Comparaison des niveaux d'efficacité globale de chaque stratégie
Comparison of the global levels of efficiency for each strategy

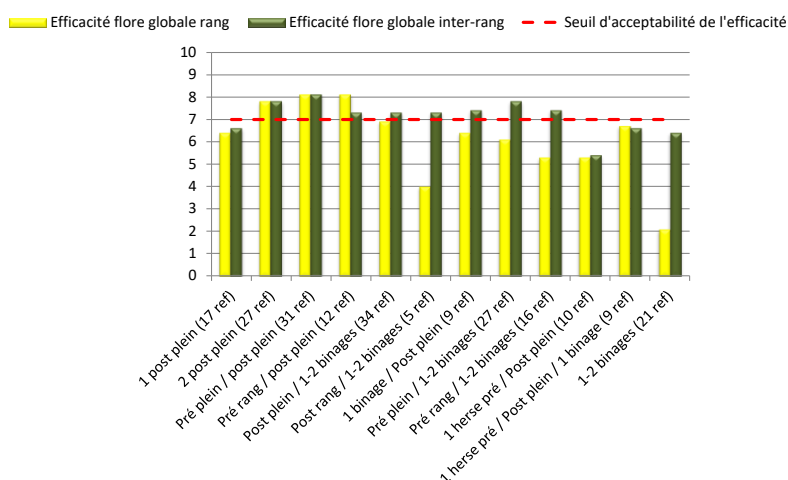


La figure 3 présente les efficacités globales des stratégies étudiées. Dans les stratégies conventionnelles du tout chimique, le passage unique de post-levée en plein (1 post en plein) offre une efficacité moyenne qui est améliorée par une seconde application en plein également (2 Post en plein). Les stratégies les plus sécurisantes demeurent celles qui combinent deux applications chimiques en plein (2 Post en plein ou 1 Pré en plein puis 1 Post en plein). En outre, apporter la pré-levée sur le rang de maïs uniquement fait perdre quelques points d'efficacité ce qui s'explique par un moindre contrôle de la flore sur l'inter-rang, mais reste néanmoins d'une performance globale supérieure à la stratégie du passage unique de post-levée (1 Post en plein).

Pour les stratégies alternatives utilisant du désherbage mécanique, le recours à la bineuse reste intéressant uniquement s'il est couplé à une application chimique en plein que ce soit en pré-levée ou en post-levée de la culture. La bineuse seule offre une efficacité bien trop aléatoire. Dans ces stratégies mixtes combinant chimie et binage, localiser les traitements chimiques sur le rang uniquement fait perdre quelques points d'efficacité en lien avec une gestion moins performante de l'inter-rang, où seule la bineuse agit.

L'utilisation de la herse étrille à la place d'une pré-levée chimique semble également aléatoire. La présence de débris végétaux ou de vivaces ainsi qu'un sol battant diminuent son efficacité ; le relai par une post-levée chimique conventionnelle ne sera pas toujours suffisant à moins qu'elle soit également complétée d'un binage.

Figure 4 : Comparaison des niveaux d'efficacité différenciée sur le rang et l'inter-rang de chaque stratégie
Comparison of the raw and middle raw levels of efficiency for each strategy



Comme on vient de le voir les stratégies alternatives peuvent offrir des efficacités à la parcelle relativement satisfaisantes. Cependant, par construction, ces stratégies vont désherber différemment le rang de maïs et l'inter-rang, contrairement au désherbage chimique conventionnel. L'alternative mécanique n'interviendra que sur l'inter-rang, et l'application chimique localisée couvrira le rang de maïs sur quelques centimètres uniquement alors que le désherbage chimique en plein assure le même contrôle de la flore sur la totalité de la surface.

La figure 4 présente pour les stratégies étudiées, les efficacités différenciées sur le rang et sur l'inter-rang. Cette distinction à la notation n'ayant pas été réalisée sur l'ensemble des essais, le nombre de références par stratégie diffère du graphique précédent ; nous étudions là un échantillon de 46 essais (sur les 63 de la base complète). A la différence du désherbage « tout mécanique », pour lequel l'efficacité sur le rang est quasi nulle, les stratégies de désherbage « tout chimique » en plein permettent d'obtenir une efficacité uniforme sur le rang et sur l'inter-rang. Dès lors que la stratégie met en œuvre une pratique différente sur le rang et sur l'inter-rang, les efficacités observées sur ces deux parties de la parcelle s'avèrent différentes. Ainsi lorsque la pré-levée chimique n'est positionnée que sur le rang alors que le rattrapage de post-levée est réalisé en plein, l'efficacité sur l'inter-rang, qui n'a reçu que la post-levée, est généralement inférieure à celle observée sur le rang qui a été désherbé chimiquement.

Nous avons vu précédemment que pour les stratégies avec une double intervention, remplacer l'une des applications chimiques (en pré-levée ou en post-levée) par une intervention mécanique contribue généralement à diminuer l'efficacité globale. Cela s'explique principalement par une efficacité plus faible sur le rang lorsque celui-ci va être désherbé par une seule application chimique, quand l'inter-rang recevra cette même application chimique complétée d'une intervention mécanique, un binage par exemple. Cependant, le positionnement de l'intervention mécanique ne va pas affecter les efficacités de la même manière. Remplacer une pré-levée chimique par un passage de herse étrille va donner une efficacité uniforme sur le rang et l'inter-rang mais relativement aléatoire puisque conditionnée au type de sol et à la présence de vivaces ou de débris. Positionner un passage de bineuse après une pré-levée chimique, en remplacement d'une post-levée chimique, risque de davantage diminuer l'efficacité sur le rang car le binage ne permettra pas de contrôler les levées échelonnées des adventices sur le rang, qui normalement seraient détruites par la post-levée chimique appliquée en plein.

De même lorsque la stratégie est une double application de post-levée, le positionnement du binage au premier ou au second passage aura un impact sur le salissement du rang. Lorsque le binage remplace le second passage de post-levée, le premier traitement qui a eu lieu en plein permet de

contrôler précocement les premières levées d'adventices sur le rang comme sur l'inter-rang puis le binage assure la maîtrise des relevées sur l'inter-rang alors qu'on compte sur la présence du maïs sur le rang pour suffisamment concurrencer les nouvelles levées. Inversement, biner précocement à la place du premier passage éliminera les adventices sur l'inter-rang mais ne permettra pas de contrôler celles qui lèvent sur le rang de maïs. Or, lors du rattrapage chimique en plein au second passage, celles-ci risquent fortement d'être à un stade trop avancé pour une efficacité optimale de la post-levée chimique, même avec des doses élevées d'herbicides.

Enfin pour les stratégies mixtes faisant intervenir le traitement chimique localisé sur le rang, on s'attend à observer une efficacité sur le rang équivalente à celle d'un passage en plein. Or ce n'est pas toujours le cas et elle apparaît en moyenne légèrement inférieure. Cela s'explique par le fait que la pulvérisation localisée sur le rang couvre une faible largeur de 20 à 30 cm centrée sur le rang de maïs alors que le binage de l'inter-rang qui lui est associé ne permet pas toujours de s'approcher assez près des pieds de maïs (selon l'écartement des rangs) pour assurer le recouvrement nécessaire au contrôle de la flore. Il en résulte alors une « zone sans recouvrement » de 2-3 centimètres sur laquelle les adventices peuvent se développer. Le perfectionnement des équipements de la bineuse (moyen de guidage, buttage des pieds de maïs sur le rang, bineuse à doigts de type Kress) permettent de limiter cet effet, ce qui n'a pas toujours été possible dans le cadre des expérimentations dont nous exploitons les résultats dans cette étude.

Tout ce que nous venons d'examiner concerne l'efficacité sur la globalité de la flore. Or le type de flore dominante est également un critère d'efficacité à prendre en compte dans l'évaluation de l'efficacité d'un programme de désherbage. Dans les tableaux suivants (Tableaux III, IV et V), nous vous proposons une synthèse des efficacités observées en fonction de différents types de flore avec 3 principales catégories : dicotylédones classiques, dicotylédones fréquentes (plus difficiles à contrôler) et graminées, ainsi qu'une différenciation de l'efficacité sur le rang et sur l'inter-rang. Le désherbage des vivaces n'est pas traité dans cette étude car quel que soit le type de stratégie, leur contrôle nécessite une approche spécifique.

Tableau III et IV : Efficacité des différentes stratégies sur dicotylédones classiques (gauche) et fréquentes (droite)
Comparison of efficiency for classic (left) and difficult (right) dicotyledonous

Légende (labels): ■ Très bonne (very good) ■ Bonne (good) ■ Moyenne (average) ■ Irrégulière (irregular) ■ Insuffisante (insufficient)

DICOTYLEDONES CLASSIQUES				DICOTYLEDONES FREQUENTES (difficiles)			
	Nb références	Efficacité Rang	Efficacité Inter-Rang		Nb références	Efficacité Rang	Efficacité Inter-Rang
Tout chimique				Tout chimique			
1 post plein	11 réf	■	■	1 post plein	9 réf	■	■
2 post plein	21 réf	■	■	2 post plein	18 réf	■	■
Pré plein / post plein	21 réf	■	■	Pré plein / post plein	19 réf	■	■
Pré rang / post plein	6 réf	■	■	Pré rang / post plein	6 réf	■	■
Mixte tout en post				Mixte Tout en Post			
Post plein / 1-2 binages	34 réf	■	■	Post plein / 1-2 binages	30 réf	■	■
Post rang / 1-2 binages	5 réf	■	■	Mixte Pré/Post			
1 binage / Post plein	3 réf	■	■	Pré plein / 1-2 binages	22 réf	■	■
Mixte Pré/Post				Pré rang / 1-2 binages	8 réf	■	■
Pré plein / 1-2 binages	24 réf	■	■	1 herse pré / Post plein	4 réf	■	■
Pré rang / 1-2 binages	8 réf	■	■	1 herse pré / Post plein / 1 binage	9 réf	■	■
1 herse pré / Post plein	9 réf	■	■	Tout mécanique			
1 herse pré / Post plein / 1 binage	12 réf	■	■	1-2 binages	9 réf	■	■
Tout mécanique							
1-2 binages	12 réf	■	■				

Le contrôle des dicotylédones classiques du maïs est globalement bien assuré par l'ensemble des stratégies proposées (tableau III). On observe quand même qu'un binage de l'inter-rang suivi d'une post-levée chimique en plein révèle une efficacité insuffisante sur le rang en raison du stade des adventices trop développé lors du traitement en plein. De même, la pré-levée chimique, en plein ou localisée sur le rang suivie d'un binage n'apparaît pas comme la stratégie la plus sécuritaire, les herbicides les plus efficaces sur dicotylédones étant principalement des herbicides de post-levée. Le tout mécanique assuré par 1 ou 2 binage(s) est comme attendu inefficace sur le rang, dans la mesure où la bineuse n'agit que sur l'inter-rang.

Des observations similaires peuvent être effectuées pour le contrôle des dicotylédones fréquentes (difficiles) et qui regroupent des espèces moins inféodées au maïs mais dont la fréquence et la densité augmentent d'année en année (Tableau IV). En référence au tout chimique conventionnel, c'est la stratégie en double application de post-levée qui offre la meilleure efficacité du fait de la diversité des modes d'action des herbicides foliaires disponibles. Parmi les stratégies mixtes faisant intervenir herbicides et intervention mécanique, c'est la post en plein suivie d'un ou deux binage(s) qui semble la plus performante avec une meilleure efficacité en raison de l'action ciblée du binage sur l'inter-rang. La pré-levée en plein suivie d'un ou deux binage(s) offre également une bonne maîtrise sur l'inter-rang mais une efficacité moyenne sur le rang. Quant à la stratégie tout mécanique, elle ne permet pas de maîtriser la flore sur le rang et offre un contrôle satisfaisant de l'inter-rang.

Tableau V : Efficacité des différentes stratégies sur graminées

Comparison of efficiency for grass

Légende (labels): ■ Très bonne (*very good*) ■ Bonne (*good*) ■ Moyenne (*average*) ■ Irrégulière (*irregular*) ■ Insuffisante (*insufficient*)

	GRAMINEES		
	Nb références	Efficacité Rang	Efficacité Inter-Rang
Tout chimique			
1 post plein	4 réf	■	■
2 post plein	7 réf	■	■
Pré plein / post plein	7 réf	■	■
Mixte Pré/Post			
Post plein / 1-2 binages	12 réf	■	■
Pré plein / 1-2 binages	6 réf	■	■
1 herse pré / Post plein	5 réf	■	■
1 herse pré / Post plein / 1 binage	6 réf	■	■
Tout mécanique			
1-2 binages	4 réf	■	■

Les graminées sont moins fréquentes dans les 46 essais exploités dans cette étude ce qui explique que pour certaines stratégies il n'y ait pas de résultats. En outre, pour les stratégies présentées dans le tableau V, le nombre de références est souvent faible ce qui doit amener à la plus grande prudence quant aux enseignements à en tirer. Ces résultats montrent cependant que la maîtrise des graminées sur le rang de maïs nécessite soit une intervention chimique en pré-levée soit une double intervention chimique en post-levée. De même sur l'inter-rang, s'il n'y a aucune application d'herbicide racinaire, le recours à un double binage ou à une post-levée en plein s'avère indispensable.

Tableau IVI : Risque de manque de sélectivité

Comparison of the levels of selectivity for each strategy

Légende (labels): ■ Nul à modéré (*no to moderate*) ■ Modéré à assez élevé (*moderate to quite high*) ■ Elevé (*high*)

	risque de manque de sélectivité
Tout chimique	
1 post plein	■
2 post plein	■
Pré plein / post plein	■
Pré rang / post plein	■
Mixte tout en post	
Post plein / 1-2 binages	■
Post rang / 1-2 binages	■
1 binage / Post plein	■
Mixte Pré/Post	
Pré plein / 1-2 binages	■
Pré rang / 1-2 binages	■
1 herse pré / Post plein	■
1 herse pré / Post plein / 1 binage	■
Tout mécanique	
1-2 binages	■

La sélectivité sur la culture (Tableau VI) est également nécessaire au maintien de son potentiel de rendement (peuplement, état sanitaire ou de stress). Dans le cadre de stratégies tout chimique (en plein ou sur le rang), dans des conditions optimales de positionnement, la sélectivité est généralement bien maîtrisée. Dans les stratégies mixtes, celles comportant un passage chimique (en plein ou sur le

rang) suivi d'un binage ne présentent pas de risque particulier au regard de la sélectivité, sous réserve d'un risque d'arrachage des pieds de maïs si l'alignement des rangs au semis n'est pas parfaitement compatible avec le binage. Le risque le plus important apparaît avec des interventions mécaniques précoces comme la herse étrille, sur maïs jeune, la totalité de la parcelle étant soumise au passage de l'outil.

L'efficacité d'une stratégie est un critère essentiel dans son choix, mais d'autres tels que les conditions de mise en œuvre (faisabilité technique) ou les critères économiques sont tout aussi importants.

Tableau VII : Comparaison des niveaux de faisabilité pour chaque stratégie
Comparison of the levels of adaptability for each strategy

Légende (labels): Nombre de passages pour désherber (Number of passages for weeding): 1 2 3 4
 Souplesse des fenêtres d'intervention (flexibility of intervention periods): Bonne (good) Moyenne (average) Faible (low) Insuffisante (insufficient)
 Sensibilité aux conditions pédoclimatique (Sensitivity to pedoclimatic conditions): Faible (low) Moyenne (average) Forte (high)

	Nombre de passage pour désherber	Souplesse des fenêtres d'intervention	Contraintes liées à l'état du sol
Tout chimique			
1 Post en plein	1		
2 Post en plein	2		
Pré plein / Post plein	2		
Pré rang / Post plein	2		
Mixte tout en post			
Post plein / 1-2 binages	2-3		
Post rang / 1-2 binages	2-3		
1 Binage post / Post plein	2		
Mixte pré/Post			
Pré plein / 1-2 binages	2-3		
Pré rang / 1-2 binages	2-3		
1 Herse pré / Post en plein	2		
1 Herse pré / Post en plein / 1 binage	3-4		
Tout mécanique			
1-2 Binages	1-2		

Dans un contexte de plus en plus contraignant pour l'exploitant, la faisabilité du désherbage est un critère de choix, il est déterminé par (Tableau VII) :

- le nombre de passages à réaliser, le plus réduit possible selon le souhait des producteurs
- la souplesse des fenêtres d'intervention liée à la sensibilité aux contraintes climatiques au moment de la mise en œuvre optimale du traitement, et aux exigences spécifiques qui peuvent se cumuler selon le type d'intervention (chimique ou mécanique)
- les contraintes liées à l'état du sol: type de sol, préparation du sol (présence de mottes et régularité du lit de semences) et potentialité agronomique (aptitude au ressuyage, présence ou non d'éléments grossiers).

Si on ne tient compte que du nombre de passages pour désherber, les stratégies faisant appel à une ou des intervention(s) mécanique(s) sont globalement défavorisées. Cela s'explique notamment par une efficacité qui n'est qu'instantanée contrairement à des stratégies mettant en œuvre des herbicides. De plus, les relevées successives engendrées par chaque intervention mécanique imposent un nombre de passages supérieur pour couvrir la période de sensibilité de la culture à la concurrence des adventices.

Les stratégies mixtes apparaissent plus compliquées à mettre en œuvre, car elles combinent les contraintes des stratégies chimiques et des stratégies mécaniques. De plus, l'efficacité aléatoire de l'intervention mécanique peut augmenter le nombre de passages complexifiant sa mise en œuvre. La sensibilité aux conditions pédoclimatiques est globalement plus importante pour les interventions

mécaniques en raison des exigences spécifiques de travail du sol et de ressuyage, les interventions chimiques étant moins contraignantes sur cet aspect.

Afin d'intégrer des éléments décisifs dans le choix d'un type de technique de désherbage, nous avons introduit quelques indicateurs économiques spécifiques (Tableau VIII) tels que :

- le coût moyen de la stratégie qui comprend le coût des produits phytosanitaires (base 2018), le coût du matériel (amortissement, taux de dépréciation et frais financiers), le coût de la traction (dont carburant + GPS), et le coût de la main d'œuvre ;
- le temps exigé pour la mise en œuvre de chacune des stratégies étudiées ;
- la consommation en carburant du matériel tenant compte du cumul des différents passages nécessaires pour chaque stratégie
- La consommation en énergie primaire totale et les émissions en GES. Tiens compte de la consommation de fabrication et d'utilisation des machines (durée de vie, carburant utilisées...) ainsi que des herbicides.
- l'IFT (indice de fréquence de traitement), permettant de quantifier l'utilisation des produits phytosanitaires.

Tableau VIII : Comparaison des indicateurs économiques de chaque stratégie.

Comparison of the economic indicators for each strategy

Légende (labels): Coût moyen (average cost) (€/ha): ■ Faible (low) ≤60 ■ Faible à modéré (low to moderate) >60-85 ■ Moyennement élevé (quite high) >85-110 ■ Élevé (high) >110

Temps passé (work time) (min/ha) ■ Faible (low) <10 ■ Faible à modéré (low to moderate) ≥5-30 ■ Modéré (moderate) ≥30-45 ■ Moyennement élevé (quite high) ≥45-70 ■ Élevé (high) ≥70

Consommation en carburant (fuel consumption)(L/ha) ■ Faible (low) <3 ■ Modéré (moderate) ≥3-6 ■ Moyennement élevé (quite high) ≥6-10 ■ Élevé (high) ≥10

Consommation en énergie primaire totale (primary energy consumption) (MJ/ha) : ■ Faible (low) <100 ■ Modéré (moderate) ≥100-250 ■ Moyennement élevé (quite high) ≥250-500 ■ Élevé (high) ≥500

Emission en GES (GHG emissions) (kgéqCO2/ha) : ■ Faible (low) <8 ■ Modéré (moderate) ≥8-16 ■ Moyennement élevé (quite high) ≥16-30 ■ Élevé (high) ≥30

IFT (treatment frequency index) ■ Nul (no) =0 ■ Faible (low) >0-0.5 ■ Modéré (moderate) ≥0.5-1.5 ■ Élevé (high) ≥1.5

	Coût moyen (€/ha)	Temps passé (min/ha)	Consommation en carburant (L/ha)	Consommation Energie Primaire Totale (MJ/ha)	Émission en GES (kgéqCO2/ha)	IFT
Tout chimique						
1 Post en plein	60	6	1	44.4	2.7	0.9
2 Post en plein	94	12	2	88.8	5.6	1.5
Pré plein / Post plein	98	12	2	88.8	5.6	1.7
Pré rang/ Post plein	66	6	1	44.4	2.7	1.1
Mixte tout en post						
Post plein / 1-2 binages	89-117	36-66	7-13	275.1-505.9	17-31.3	0.9
Post rang / 1-2 binages	66-95	45-75	8-15	363.9-594.6	22.4-36.7	0.3
1 Binage post/ Post plein	89	36	7	275.1	17	0.8
Mixte pré/Post						
Pré plein /1-2 binages	92-120	36-66	7-13	275.1-505.9	17-31.3	0.9
Pré rang / 1-2 binages	50-79	30-60	6-12	230.8-461.5	14-28	0.4
1 Herse pré / Post en plein	77	18	4	152.0	9.4	0.8
1 Herse pré / Post en plein / 1-2 binages	106-134	48-78	9-15	382.8-613.5	23.7-38	0.8
Tout mécanique						
1-2 binages	28-57	30-60	6-12	230.8-461.5	14-28	0

Pour les estimations des différents paramètres nous nous sommes appuyés sur des références générales issues des barèmes d'entraide et des fermes types d'Arvalis, pour couvrir de façon globale les régions agricoles citées dans cette synthèse. Il faut également préciser que le semis et donc les paramètres liés à l'utilisation d'un semoir ne sont pas intégrés dans les calculs.

L'indicateur "coût moyen" montre une forte disparité. C'est un critère que nous ne pouvons pas juger indépendamment d'autres tels que la performance technique et la souplesse de mise en œuvre.

Le traitement localisé sur le rang permet d'obtenir une économie globale acceptable par rapport à un traitement en plein (environ 20€ à 40€/ha). Bien qu'il y ait un gain financier sur l'utilisation de produits

(-70% de produit épandu), celui-ci est gommé par le coût du matériel à l'hectare qui est encore aujourd'hui jusqu'à 50% plus important qu'un pulvérisateur classique (en lien avec une performance à l'hectare plus faible).

Lorsqu'on regarde le « *temps passé* » pour désherber la parcelle, on note un avantage très net pour les stratégies chimiques. En effet, les débits de chantier sont souvent inférieurs avec la plupart des outils mécaniques qu'avec un pulvérisateur et le nombre de passages est significativement supérieur. La rampe pour les traitements en localisé en Post a un débit de chantier inférieur à un pulvérisateur classique du fait d'une moindre largeur, mais l'évolution du matériel comblera probablement assez rapidement cette perte. Inévitablement, la « *consommation en carburant* » va dans le même sens : là encore, davantage d'interventions et d'aller-retours sur la parcelle (moindre largeur de passage), impliquent une plus grande consommation de carburant pour les stratégies mixtes et surtout mécaniques.

Les stratégies en Pré-levée localisée étant associées au semis dans nos essais (herbisemis), le temps passé, le carburant consommé pour désherber sont moins importants par rapport aux stratégies de Pré-levée en plein. Ces dernières dissociant le semis du désherbage, obligeant à intervenir à deux reprises.

Enfin la « *consommation en énergie primaire* » et donc les « *émissions en GES* » sont directement liées à la « *consommation en carburant* ». Inéluctablement, l'augmentation d'utilisation d'outils mécaniques ou de matériel « plus lent » tel quel les traitements en localisé conduisent à une augmentation de ces paramètres écoenvironnementaux. A noter que l'impact de la production des produits phytosanitaires sur la « *consommation en énergie primaire* » ainsi qu'en « *émission en GES* » est dérisoire comparé aux machines. Elles sont de l'ordre de 0.45 MJ/ha et 0.01 kgéqCO₂/ha pour 1500 g de substances actives produites (l'équivalent d'un pré plein /post plein).

L'IFT, diminue logiquement avec les stratégies mixtes et celles incorporant un traitement localisé sur le rang, jusqu'à s'annuler avec le tout mécanique. Là encore, ce critère ne se suffit pas à lui-même et doit être mis en regard des performances technico-économiques. On peut toutefois noter que certaines stratégies mixtes présentent un IFT équivalent à des stratégies chimiques optimisées.

CONCLUSION

Cette étude, basée sur les résultats d'essais menés en région Centre - Ile de France - Auvergne - Limousin et Bretagne - Normandie, permet de faire le point sur de multiples façons d'aborder le désherbage du maïs ; désherbage qui rappelons-le est indispensable à cette culture très sensible à la concurrence des adventices. En effet, un échec peut conduire à une perte de rendement de 10 à 100 % en fonction du type de flore et des conditions de nuisibilité. Les performances techniques ne peuvent donc pas être négligées. Cependant, nombre de producteurs, par choix ou en raison de contraintes locales, souhaitent recourir à des stratégies alternatives réduisant la dépendance aux produits phytosanitaires. La synthèse réalisée ici à partir de 15 ans travaux d'expérimentation permet de dégager quelques grandes tendances.

Le binage seul à l'intérêt d'un coût modéré et d'un IFT nul ; par contre, il ne contrôle pas la flore sur le rang de maïs. De plus, cette stratégie est souvent difficile à mettre en œuvre et est particulièrement consommatrice d'énergie primaire ainsi qu'émettrice en GES.

Les stratégies chimiques conventionnelles nécessitent souvent deux passages pour assurer des performances fiables, dès lors que l'on a une flore mixte, notamment avec des dominantes de graminées et/ou de dicotylédones difficiles à contrôler. Elles sont bien placées sur les critères du temps passé, de la « *consommation énergétique* » et en « *émissions en GES* » mais le sont moins au regard de l'IFT. Ce sont également les stratégies les plus souples vis-à-vis des conditions de mises en œuvre.

Sous le terme de stratégies mixtes, de nombreuses possibilités sont envisageables, avec des performances très variées. Les plus fiables consistent à introduire un binage en remplacement d'un traitement chimique ou en complément. Ces stratégies présentent globalement un IFT plus faible que

le désherbage chimique conventionnel. Avec des performances techniques plus aléatoires, ces stratégies sont plus délicates à mettre en œuvre qu'un désherbage chimique conventionnel mais sont toutefois moins exigeantes et plus fiables que les stratégies strictement mécaniques. Elles représentent sans doute l'un des meilleurs compromis, sous réserve d'avoir un nombre de passage en bineuse limité, au risque d'avoir une empreinte environnementale plus importante que le tout mécanique, faisant perdre en partie les bénéfices écologique liés à la réduction des phytosanitaires.

Enfin, remplacer un traitement chimique en plein par un traitement chimique localisé sur le rang de maïs permettra un gain financier important sur les produits, mais qui actuellement est pénalisé par un coût de matériel relativement élevé. L'avantage est surtout une réduction non négligeable de la dépendance aux produits phytosanitaires (diminution de 70% des coûts et de l'IFT) permettant d'atteindre les objectifs Ecophyto-2 (réduction de 50% des produits phyto), sans pour autant augmenter les contraintes de mise en œuvre et l'impact environnemental, mais au prix d'une efficacité parfois moindre, sur l'inter-rang notamment.

Pour finir, nous pouvons retenir de cette synthèse que, par choix ou lorsque les contraintes de production l'exigent, il demeure possible de désherber une culture de maïs en réduisant significativement le recours aux herbicides. Cela se fait rarement sans contrepartie, que ce soit sur le plan des performances techniques et de leur régularité ou sur celui des difficultés de mise en œuvre.

Rajoutons que l'étude économique n'est que partielle, elle ne raisonne qu'à l'échelle d'une monoculture de maïs. Pour aller plus loin, il serait judicieux d'intégrer un nombre d'indicateurs techniques et économiques plus importants tels qu'un système en assolement et donc l'amortissement du matériel sur plusieurs cultures, permettant ainsi une comparaison avec des systèmes de culture existants. Cette étude multicritère pourra faire l'objet d'un travail complémentaire réalisé par exemple avec l'outil Systerre (modèle Arvalis).

BIBLIOGRAPHIE

Urruty N., Boiffin J., Guyomard H., Deveaud T., 10/05/2015 - Usage des pesticides en agriculture : effets des changements d'usage des sols sur les variations de l'indicateur NODU [en ligne] : <https://agriculture.gouv.fr/usage-des-pesticides-en-agriculture-effets-des-changements-dusage-des-sols-sur-les-variations-de>