

La technologie

Oligo Prime[®]

RÉSULTATS 2018-2023

édition août 2024

Pierre Migner,
agronome (retraité), M.Sc., MBA

Agro
100[®]
cultiver l'innovation



TABLE DES MATIÈRES

1	PROBLÉMATIQUE	3
2	ÉTAT DES CONNAISSANCES	5
2.1.	Les stress abiotiques	5
2.2.	L'effet des herbicides sur la production de ERO	7
2.3.	La technologie Oligo Prime®	8
2.3.1.	Le rôle des signaux métaboliques	8
2.3.2.	Le rôle de l'acide fulvique et du C-plex®	9
2.3.3.	Le rôle du chitosane	9
3	HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS	10
3.1.	Hypothèses de recherche	10
4	MÉTHODOLOGIE	11
4.1.	Sites	11
4.1.1.	CEROM	11
4.1.2.	University of Guelph	11
4.1.4.	BlackCreek Research	11
4.1.5.	Eastern Crop Doctor	11
4.2.	Protocoles	12
4.2.1.	Essai glyphosate (groupe 9) dans le maïs	12
4.2.2.	Essai glyphosate (groupe 9) dans le soya	13
4.2.3.	Essai herbicides + biostimulant dans le maïs	14
4.2.4.	Essai herbicides + biostimulant dans le soya	15
5	RÉSULTATS	16
5.1.	Essai glyphosate (groupe 9) dans le maïs	16
5.2.	Essai glyphosate (groupe 9) dans le soya	17
5.3.	Essai herbicides + biostimulant dans le maïs	18
5.4.	Essai herbicides + biostimulant dans le soya	19
6	CONCLUSION	20
7	BIBLIOGRAPHIE	21



PROBLÉMATIQUE

1

L'augmentation de la population mondiale et les limites à l'augmentation de la productivité agricole préoccupent les experts depuis de nombreuses années. L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), dans leur rapport sur les perspectives agricoles 2021-2030, prévoient une augmentation de la demande alimentaire moyenne par personne de 40 % en 2030. Cette hausse de la disponibilité alimentaire moyenne devra être obtenue principalement par une augmentation des rendements agricoles (87 %), par l'augmentation de l'intensité des cultures (7 %) et par l'agrandissement des surfaces cultivables (6 %) ^{1*}.

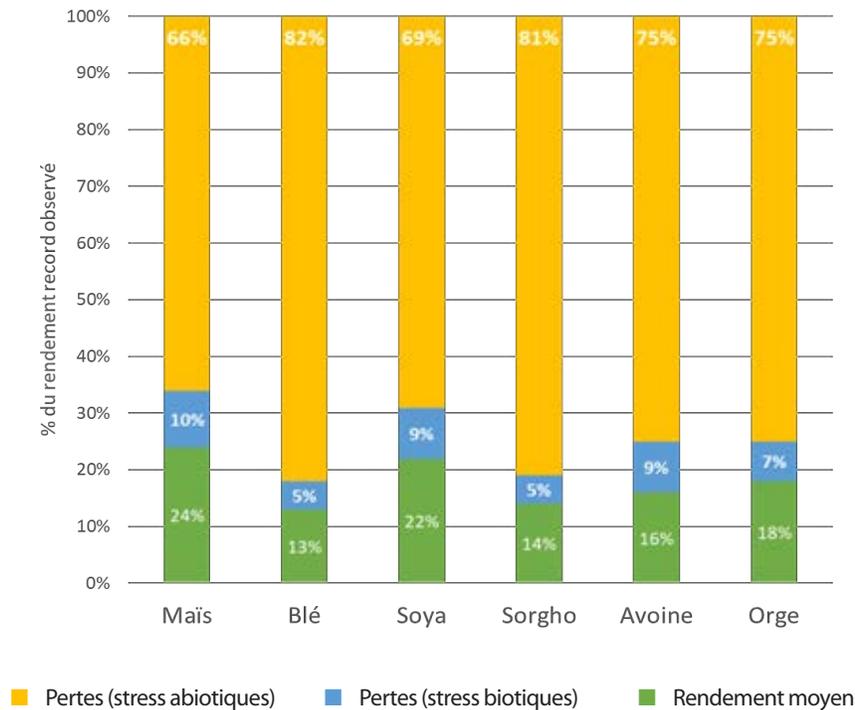
La durabilité environnementale des pratiques agricoles est un deuxième défi auquel l'agriculture fait face. Le réchauffement planétaire demande une réduction de l'émission des gaz à effet de serre (GES); déjà, les gaz à effet de serre émis par l'industrie agricole représentent un pourcentage net de 7 % des GES émis au Canada². De plus, l'acceptabilité sociale liée à l'utilisation des organismes génétiquement modifiés, des produits phytosanitaires et des engrais synthétiques diminue. Sachant que la conversion à une agriculture « biologique » ne permettra pas d'atteindre les objectifs d'augmentation des rendements³,

les agriculteurs doivent trouver des solutions qui permettront d'augmenter la productivité, tout en minimisant l'impact environnemental.

L'augmentation de la productivité des cultures pourrait provenir de la réduction des pertes liées aux stress biotiques et abiotiques. Une analyse des rendements observés dans plusieurs régions du monde, indique que les rendements du riz, du maïs et du blé représentent respectivement 59 %, 35 % et 65 % du rendement théorique maximal. Les facteurs qui contribuent à ces écarts de rendement sont multiples et comprennent la gestion des nutriments, les stress hydriques, les inondations, les problèmes de sols (salinité, toxicités dues aux métaux lourds et aux produits chimiques, pH, etc.), les maladies, les insectes, les mauvaises herbes, etc. ⁴

Une autre évaluation de l'impact des stress biotiques et abiotiques effectuée par Buchanan *et al.* (2000) indique que les rendements des cultures n'atteignent en moyenne que 18 % du rendement théorique maximal et que les pertes moyennes de rendement associées aux stress biotiques varient de 5 % à 10 % tandis que les pertes associées aux stress abiotiques (environnementaux) varient de 66 % à 82 %. Les stress abiotiques les plus importants demeurent les stress hydriques (déficits hydriques) et la salinité des sols⁵.

* Ces chiffres correspondent à la liste des ouvrages numérotés apparaissant dans la bibliographie.

Figure 1. Pertes de rendement associées aux stress biotiques et abiotiques⁵

Les agriculteurs ne peuvent contrôler la fréquence et l'importance des stress environnementaux. L'introduction relativement récente des biostimulants dans la gamme d'outils à la disposition des agriculteurs permet d'envisager une réduction des impacts négatifs des stress abiotiques.

Un biostimulant est défini comme étant :

« [...] une substance ou un microorganisme utilisé sur les plantes afin d'améliorer l'efficacité de leur utilisation des nutriments, leur résistance aux stress abiotiques et ainsi le rendement et la qualité de la récolte, nonobstant le contenu en éléments nutritifs. Le terme biostimulants désigne aussi des produits contenant des mélanges de ces substances et/ou microorganismes. »^{6,7}

Les travaux menés par Agro-100 ltée portaient sur l'utilisation d'hormones végétales pouvant réduire l'impact des stress abiotiques causés par l'utilisation d'herbicides sur les rendements du maïs, du soya et du blé. L'ajout de signaux métaboliques dans un mélange d'herbicides et d'eau a permis de réduire les pertes de rendement associées aux stress causés par les herbicides. Ces résultats ont été confirmés par deux étudiants à la maîtrise qui ont démontré que l'utilisation de certains signaux métaboliques permettait aux plantes de corriger le taux de photosynthèse pendant la période de stress associée aux herbicides^{8,9}.

L'objectif est d'améliorer la capacité des cultures à tolérer les stress abiotiques en utilisant des biostimulants qui réduiront l'impact des stress abiotiques sur le rendement des cultures.



ÉTAT DES CONNAISSANCES

2

2.1. Les stress abiotiques

Les conditions environnementales défavorables causées par les changements climatiques seront de plus en plus fréquentes. Les températures élevées, les déficits hydriques, la salinité ne sont que des exemples de conditions qui auront des impacts importants sur la croissance des plantes¹⁰.

Un stress abiotique est défini de plusieurs façons. On le définit comme un « facteur environnemental qui peut avoir des effets nuisibles sur les plantes. Ces facteurs environnementaux peuvent inclure la sécheresse, le froid ou la chaleur extrême, les vents violents, l'ozone, les radiations solaires, les métaux lourds, la salinité du sol, les produits chimiques, les dommages mécaniques, etc. »¹¹. La définition proposée par Blumwald simplifie la notion de stress abiotique pour la ramener à « toute condition environnementale qui empêche les plantes de réaliser leur plein potentiel génétique »¹². Ben Ari et Lavi ajoutent la notion « d'environnement spécifique » à la définition. En effet les plantes étant sessiles, elles ne peuvent simplement changer d'environnement pour éviter les stress abiotiques. Elles ont donc développé des systèmes complexes de processus

physiologiques et développementaux afin d'assurer leur croissance et leur reproduction¹³. Ainsi, un déficit en eau ou la salinité des sols causeront dans un premier temps une réduction du potentiel hydrique et une déshydratation cellulaire; dans un deuxième temps, la fermeture des stomates et la diminution de la concentration en dioxyde de carbone auront un impact négatif sur la photosynthèse. Les électrons ne participant plus à la fixation du CO_2 vont entraîner la production d'espèces réactives d'oxygène¹² (voir figure 2).

Les stress abiotiques auront comme conséquence directe ou indirecte la production des espèces réactives d'oxygène (ERO)¹⁴. Ces molécules contiennent au moins un électron libre dans leurs orbites. Les principales formes de ERO sont le radical superoxyde ($\text{O}_2^{\cdot-}$), le radical perhydroxyle (HO_2^{\cdot}), le radical hydroxyle ($\cdot\text{OH}$), le radical peroxyde (RO_2^{\cdot}) et le radical alkoxyde (RO^{\cdot}), ainsi que des formes non radicales comme le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2)¹⁵.

Le radical superoxyde ($\text{O}_2^{\cdot-}$) est habituellement le premier formé dans les chloroplastes. Quoique sa demi-vie soit courte (3,1-3,9 μs) et sa distance de diffusion petite (190 nm), il peut diffuser hors du chloroplaste et atteindre les membranes cellulaires pour causer des dommages¹⁶. C'est cependant son rôle de précurseur à la formation du radical

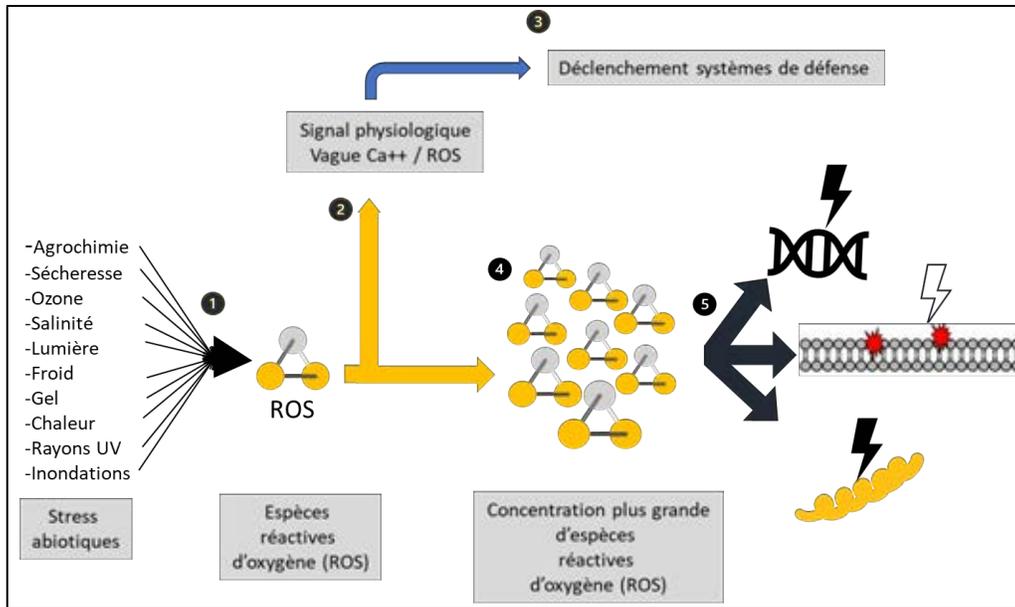


Figure 2. Séquence d'événements suivant l'apparition des stress abiotiques.

- ① Les stress abiotiques causent la production d'espèces réactives de l'oxygène.
- ② Les ERO sont en premier lieu des signaux qui avec le Ca⁺⁺ vont se propager à travers la plante pour
- ③ déclencher les mécanismes de défense.
- ④ La concentration des ERO augmente et les mécanismes de défense de la plante sont incapables de maintenir l'équilibre dans les cellules.
- ⑤ Les ERO vont attaquer les membranes cellulaires, l'ADN et les protéines, causant ainsi des dommages importants aux plantes.

hydroxyle ($\cdot\text{OH}$) et de l'oxygène singulet ($^1\text{O}_2$), beaucoup plus réactifs et toxiques, qui aura un impact plus important sur les dommages de la cellule, et plus particulièrement sur la peroxydation des lipides des membranes cellulaires¹⁷. Malgré une courte demi-vie de 3 μs et une petite distance de diffusion de 100 nm, l'oxygène singulet ($^1\text{O}_2$) causera des dommages aux protéines, pigments, acides nucléiques et lipides¹⁸.

Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) est une molécule modérément active qui est obtenue par la réduction et la protonation du radical superoxyde ($\text{O}_2^{\cdot-}$). Cette molécule peut aussi être produite directement par le processus de photorespiration dans des conditions de stress hydrique¹⁹. Le peroxyde d'hydrogène a une demi-vie relativement longue (1 ms) et peut traverser les membranes cellulaires. À de faibles concentrations, le peroxyde d'hydrogène agit en tant que signal contrôlant plusieurs procédés physiologiques (sénescence, photorespiration, photosynthèse, mouvement des stomates)¹⁴. Cependant, à des concentrations plus grandes, le peroxyde d'hydrogène oxydera la cystéine et la méthionine, inactivera l'enzyme super oxyde dismutase (SOD) et réduira de 50 % l'activité de plusieurs enzymes¹⁷. Les espèces réactives d'oxygène sont donc capables de réagir rapidement et d'oxyder une variété de constituants cellulaires, incluant les protéines, l'ADN, l'ARN et les lipides^{14,20}.

La plante peut réduire l'impact des espèces réactives d'oxygène grâce à des systèmes de défense naturels répartis en deux catégories. Les antioxydants enzymatiques, tels le SuperOxideDismutase (SOD), la Catalase CAT, Ascorbate Peroxidase (APX), POX, Monodehydroascorbate Reductase (MDHAR), Dehydroascorbate Reductase (DHAR), Glutathione S-Transferase (GST), Glutathione Peroxidase (GPX), AOXs, Peroxiredoxin (PRX), et Thioredoxin (TRX) réduisent la concentration de ERO en les transformant en H_2O_2 et ultimement en H_2O ²¹.

Les antioxydants non enzymatiques contribuent à la réduction de la concentration des ERO et constituent la deuxième ligne de défense. Cette catégorie de composés comprend les caroténoïdes, le tocophérol, l'acide ascorbique, la mélatonine, certains phénoliques et le glutathion²². L'acide ascorbique et le tocophérol récupèrent les ions OH^- et $^1\text{O}_2$, protégeant du même coup les chloroplastes²³. Le glutathion est un tripeptide qui agit comme réducteur et qui peut inactiver les ERO. Les composés phénoliques, tels les flavonoïdes, les tanins et la lignine agissent en récupérant et inactivant les ERO dans les cellules²².

La quantité de ERO produite par les cellules sera fonction de l'importance et de la durée du stress. Si le stress dure,

l'accumulation des ERO surpassera la capacité des systèmes de défense naturels de la plante²⁰. Les systèmes de défense des cellules doivent maintenir un équilibre avec les ERO.

Les espèces réactives d'oxygène agissent comme signal métabolique qui communique rapidement la perception d'un événement stressant (blessure mécanique ou chimique, maladie, etc.) et l'accumulation des ERO à toute la plante afin de permettre l'acclimatation et la mise en place des mécanismes de défense²⁴.

Ce signal est diffusé grâce à la vague Ca^{++} /ERO. Ce processus, accéléré par la protéine RBOHD, se propage automatiquement d'une cellule à l'autre; lorsque déclenchée dans une cellule, elle cause l'accumulation de ERO dans les cellules voisines et éventuellement dans toute la plante. Ce signal déclenche dans la plante les mécanismes de défense qui déroutent les ressources habituellement attribuées au support de la croissance vers un métabolisme de stress et de défense²⁵. Il coordonne aussi la réponse des stomates aux stress hydriques ou de chaleur²⁶. Le signal transmis par les ERO est non spécifique à un stress en particulier, mais il accompagne d'autres signaux qui apporteront cette spécificité. Ces autres mécanismes ou molécules, tels des signaux électriques, des hormones, des vagues de calcium, sont impliqués dans la transmission des signaux, des racines vers les feuilles et inversement^{27,28}.

L'augmentation de la concentration de ERO dans les cellules mènera les organelles de la cellule à activer les cascades de signalisation qui permettront à la plante de mieux résister aux stress abiotiques. Les ERO peuvent interagir avec des intermédiaires tels le Ca^{++} , MAPK, l'acide jasmonique, l'acide abscissique et l'éthylène pour déclencher d'autres chemins de signalisation qui mèneront à des changements au niveau de l'expression des gènes²². L'augmentation de la concentration du Ca cellulaire activera certaines kinases protéiques qui viendront réguler l'expression de certains gènes en phosphorylant ou en déphosphorylant des facteurs de transcription¹². Des hormones végétales telles l'acide abscissique, la cytokinine, l'acide gibbérellique, l'auxine, l'acide salicylique, l'acide jasmonique et les brassinostéroïdes jouent aussi des rôles importants dans l'acclimatation des plantes aux stress abiotiques²⁹. Ces hormones végétales auront un rôle important à jouer dans la gestion des interférences entre les mécanismes de défense^{12,30}.



2.2. L'effet des herbicides sur la production de ERO

Les herbicides sont de petites molécules qui agissent en inhibant des cibles moléculaires spécifiques dans les voies métaboliques primaires des plantes, ce qui entraîne des conséquences catastrophiques et mortelles. Le stress induit par les herbicides génère des espèces réactives d'oxygène (ERO), mais on sait peu de choses sur le lien entre chaque mode d'action d'herbicide et leur capacité respective à induire la formation de ERO. En effet, certains herbicides (groupes 5, 6, 10, 12, 13, 14, 18, 19, 22, 24 et 27) provoquent des poussées spectaculaires des concentrations de ERO dans le cadre de leur mode d'action primaire, tandis que d'autres herbicides (groupes 1, 2, 9, 29 et 4) peuvent générer des ERO comme effet secondaire du stress qu'ils ont imposé aux plantes. (Traxler et coll., 2023) (Caverzan et coll., 2019).

La sélectivité des herbicides est définie comme le rapport entre la survie des mauvaises herbes et les dommages causés aux cultures. C'est le mécanisme par lequel certaines espèces végétales sont préférentiellement contrôlées ou tuées tandis que d'autres restent non ou moins affectées par l'herbicide. La sélectivité des herbicides s'explique par une combinaison des mécanismes suivants³¹.

- ③ Différences entre les plantes en ce qui concerne l'interception et l'absorption de l'herbicide.
- ③ Métabolisme différent entre les cultures et les mauvaises herbes ; les mauvaises herbes sont moins capables que la culture de métaboliser et d'inactiver l'herbicide sélectif.
- ③ Physique : les herbicides peuvent être appliqués dans une zone différente ou à un moment différent, ce qui minimise l'impact sur la culture.
- ③ Utilisation d'antidotes ou de protecteurs qui rendent l'herbicide moins toxique pour la culture.

Le métabolisme différentiel de l'herbicide est l'un des facteurs les plus importants expliquant la sélectivité des herbicides. Les cultures ont la capacité de métaboliser plus rapidement les herbicides, ce qui leur permet de résister à l'application des herbicides³².

2.3. La technologie Oligo Prime®

Les cultures ont la capacité de se défendre contre les dommages causés par les ERO créés lors d'événements de stress abiotiques ou par les ERO générés par les herbicides. Les mécanismes de défense contre les ERO comprennent des composants enzymatiques et non enzymatiques qui servent à équilibrer la production et la désintoxication des ERO.

La **technologie Oligo Prime®** est conçue pour augmenter l'efficacité des mécanismes de défense naturels présents dans toutes les plantes. Elle s'appuie sur quatre composantes :

- 1 les signaux métaboliques ;
- 2 la technologie C-plex® ;
- 3 l'acide fulvique ;
- 4 le chitosane.

La synergie entre ces quatre technologies permet aux produits contenant la technologie Oligo Prime® de mieux performer et d'offrir des rendements économiques largement supérieurs à 3 pour 1.

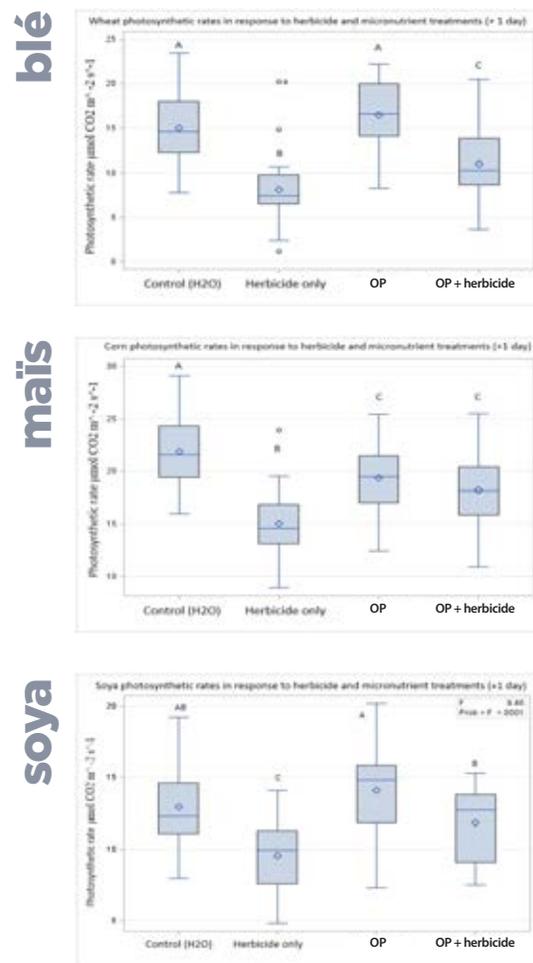
2.3.1. Le rôle des signaux métaboliques

Jusqu'à récemment, les études sur les phytohormones se concentraient sur le rôle de l'acide jasmonique (JA), l'acide salicylique (SA), les gibbérellines (GA) et l'acide abscissique (ABA). Il est maintenant clair que la signalisation induite par les phytohormones se produit grâce à la régulation du génome ou avec une augmentation de la production de métabolites secondaires.

Les métabolites secondaires sont synthétisés dans différents compartiments cellulaires et comprennent des composés phénoliques, des terpénoïdes et des alcaloïdes dont les principales fonctions incluent la protection contre les stress biotiques et abiotiques.

L'ajout de métabolites secondaires à la technologie Oligo Prime® permet de réduire l'impact négatif des stress associés aux herbicides sur la photosynthèse. Ainsi, le taux de photosynthèse diminue de 50 % lorsque l'herbicide (blé : bromoxynil/MCPA, maïs : glyphosate, soya : glyphosate) est utilisé seul, le taux de photosynthèse diminue de 44 % pour le blé, de 30 % pour le maïs et de 20 % pour le soya lorsque mesuré un jour après l'application. L'ajout de métabolites secondaires aux herbicides permet de réduire la baisse du taux de photosynthèse à 22 % pour le blé, de 16 % pour le maïs et de 10 % pour le soya⁸ (voir figure 3).

Figure 3. Effet des métabolites secondaires sur le taux de photosynthèse



Les métabolites secondaires inclus dans la technologie Oligo Prime® ont aussi un impact sur le génome des plantes et activent la production de 71 protéines et enzymes défensifs qui jouent un rôle dans la réduction de l'impact des ERO³³.

2.3.2. Le rôle de l'acide fulvique et du C-plex®

Les substances humiques sont divisées en différentes catégories qui comprennent les acides humiques, les acides fulviques et les humines. Historiquement, les acides humiques étaient considérés comme des molécules plus grosses avec des poids moléculaires allant jusqu'à cent mille daltons, tandis que les acides fulviques ne sont généralement que quelques milliers de daltons. Comme indiqué ci-dessus, l'acide fulvique est considéré comme la fraction organique du sol soluble à la fois dans l'alcali et dans l'acide. Les acides fulviques ont une plus grande acidité totale, un plus grand nombre de groupes carboxyle et des capacités d'adsorption et d'échange cationique plus élevées que l'acide humique. Les acides fulviques sont responsables de la chélation et de la mobilisation des ions métalliques, y compris le Fe et l'Al. Compte tenu de leur petite taille moléculaire, les acides fulviques peuvent traverser les micropores des systèmes membranaires biologiques ou artificiels, contrairement aux acides humiques⁶.

La capacité de l'acide fulvique à améliorer l'absorption des nutriments a été rapportée dans divers systèmes. Les premiers travaux ont enregistré une augmentation de l'absorption de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe et Zn dans les plants de concombre cultivés en solution Hoagland. Les acides fulviques ont été signalés pour améliorer l'absorption du phosphate ³²P dans le blé et plusieurs études se sont concentrées sur l'interaction des acides fulviques avec le Fe. Dans un système de sol modèle sans plantes, l'acide fulvique a été rapporté comme un complexe Fe³⁺ dans le sol sous une forme soluble qui pourrait être absorbée par les plantes⁶.

La capacité des matériaux humiques à former des cations complexes a été démontrée avec l'acide fulvique. Le C-plex® est une molécule dérivée de l'acide fulvique qui a une taille plus petite et une capacité d'échange cationique plus élevée. Cette taille plus petite est obtenue grâce à un processus digestif exclusif qui donne des molécules de quelques centaines de daltons. Cette petite taille permet une absorption rapide et facile par la plante et une très grande capacité complexante.

2.3.3. Le rôle du chitosane

Le chitosane est un biopolymère naturel modifié à partir de chitines qui agit comme un biostimulant et un éliciteur en agriculture. Il est non toxique, biodégradable et biocompatible qui favorise une application très large. Il améliore la réponse physiologique et atténue l'effet néfaste des stress abiotiques. Le traitement de chitosane stimule le taux de photosynthèse et la fermeture des stomates, augmente la concentration des enzymes antioxydantes et induit la production d'acides organiques, de sucres, d'acides aminés et d'autres métabolites qui sont exigés pour le contrôle des stomates, la production des signaux métaboliques de stress et la gestion énergétique en condition de stress³⁴.



Le chitosane active plusieurs gènes, protéines, et métabolites secondaires dans les plantes. Le chitosane provoque la production de signaux et augmente la concentration de molécules secondaires telles que le peroxyde d'hydrogène et l'oxyde nitrique. Sous stress biotique, le chitosane peut stimuler des phytoalexines, les protéines liées à des pathogénèses, et des inhibiteurs de protéinase. Le traitement préventif avec du chitosane avant l'exposition aux stress abiotiques augmente la croissance de plante, la production des enzymes antioxydantes et des métabolites secondaires qui favorisent la production des enzymes défensives et l'acide abscissique (ABA). Cependant, les réponses des plantes dépendent du type de chitosane, des concentrations, et des stades de développement des cultures³⁵.

L'addition de chitosane à la technologie Oligo Prime® permet d'augmenter la capacité des cellules à produire les enzymes défensifs nécessaires à l'inactivation des ERO causés par les herbicides.



HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS

3

3.1. Hypothèses de recherche



utilisation d'herbicides cause une augmentation de la production de ERO. La technologie Oligo Prime® favorise une augmentation de la concentration des enzymes spécifiques à l'inactivation des ERO et une meilleure mobilisation des oligoéléments nécessaires à la croissance des plantes. Les hypothèses spécifiques vérifiées dans cette proposition de recherche sont :

- ① l'utilisation de Oligo Prime® en mélange avec l'herbicide glyphosate (groupe 9) permettra d'augmenter le rendement de la culture;
- ② l'utilisation de Oligo Prime® en mélange avec des herbicides générant des quantités importantes de ERO permettra d'augmenter le rendement de la culture.

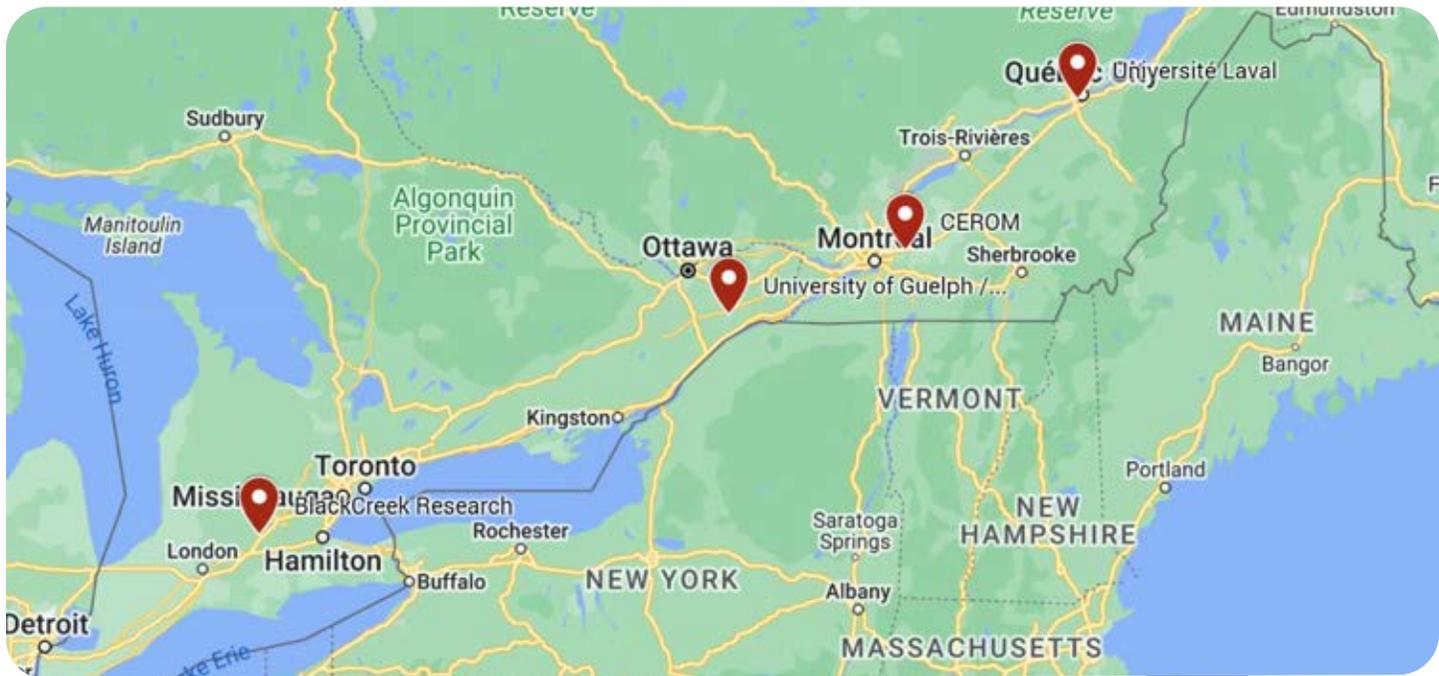


Figure 4. Localisation des sites de recherche

MÉTHODOLOGIE

4

4.1. Sites

Les essais ont été effectués sur des fermes de recherche localisées au Québec et en Ontario entre les années 2018 et 2023.

4.1.1. CEROM

La ferme de recherche du CEROM est située au 740, chemin Trudeau, Saint-Mathieu-de-Beloil (Québec) J3G 0E2. Pour la période du 1^{er} avril au 31 octobre, l'accumulation moyenne (entre 1979 et 2008) de degrés jours (base 0) se situe entre 3002 et 3189. Le nombre d'unités thermiques maïs se situe entre 2900 et 3100 (8 années sur 10).

4.1.2. Université de Guelph

La ferme de recherche de l'*University of Guelph* est située au 12088 Baker Road, Winchester (Ontario) K0C 2K0.

4.1.3. Université Laval

La ferme de recherche de l'Université Laval est située au 521, QC-138, Saint-Augustin-de-Desmaures (Québec) G3A 1W7. Pour la période du 1^{er} avril au 31 octobre, l'accumulation moyenne (entre 1979 et 2008) de degrés jours (base 0) se situe entre 2627 et 2814. Le nombre d'unités thermiques maïs se situe entre 2300 et 2500 (8 années sur 10).

4.1.4. BlackCreek Research

La ferme de recherche de la compagnie BlackCreek Research est située au 886613 Oxford Rd 8, Bright (Ontario) N0J 1B0.

4.1.5. Eastern Crop Doctor

La ferme de recherche de la compagnie Eastern Crop Doctor est située au 11343 Vancamp Road, Winchester (Ontario) K0C 2K0.

4.2. Protocoles

Les essais ont été conduits sur des champs de maïs et de soya. Les cultivars et hybrides utilisés furent choisis en fonction de la zone; dans tous les cas, il s'agissait de cultivars et hybrides résistants au glyphosate. Les taux de semis utilisés étaient entre 75 000 et 84 000 plants/hectare pour le maïs et de 250 000 à 290 000 plants/hectare pour le soya. Les semis furent effectués avec des semoirs de précision à des profondeurs de 3,5 à 5 cm.

4.2.1. Essai glyphosate (groupe 9) dans le maïs

Le CropBooster OP, un biostimulant foliaire (15 % N – 3 % P₂O₅ – 6 % K₂O avec 2 % S, 0,02 % B, 0,05 % Mn, 0,05 % Mo, 0,05 % Zn, 0,5 % EDTA) enrichi avec la technologie Oligo Prime® (0,34 % C-plex®, 0,12 % acide fulvique, 0,25 % signaux métaboliques, 0,1 % chitosane) fut ajouté à un mélange herbicide contenant du glyphosate (*RoundUp Weathermax*, 900 g a.i./hectare). Les herbicides du groupe 9 inhibe la production de l'enzyme EPSPS et la formation d'acides aminés essentiels. Ils contribuent à la production de quantités importantes de ERO.

Les traitements sont présentés dans le tableau 1.

Le traitement témoin fut le glyphosate (*RoundUp Weathermax*, 900 g a.i./hectare) appliqué seul. La bouillie obtenue a été appliquée à un taux de 200 litres/hectare. Les traitements ont été effectués entre les stades V3 et V8. Les traitements ont été répliqués 4 ou 6 fois, et disposés en blocs complètement randomisés. Les analyses statistiques ont été effectuées avec R 4.2.2³⁶. Une analyse de variance et une comparaison des moyennes obtenues a été faite, utilisant la fonction *TukeyHSD* du programme statistique.



Tableau 1. Liste des traitements dans l'essai groupe 9 maïs

N° TRT	Traitement	Classification HRAC (groupe)	Taux d'application	
1	Weedy Control	—	—	—
2	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	adjuvant	0,2	% v/v
3	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	adjuvant	0,2	% v/v
	CropBooster OP	biostimulant	2	l/ha

4.2.2. Essai glyphosate (groupe 9) dans le soya

Le CropBooster OP, un biostimulant foliaire (15 % N – 3 % P₂O₅ – 6 % K₂O avec 2 % S, 0,02 % B, 0,05 % Mn, 0,05 % Mo, 0,05 % Zn, 0,5 % EDTA) enrichi avec la technologie Oligo Prime® (0,34 % C-plex®, 0,12 % acide fulvique, 0,25 % signaux métaboliques, 0,1 % chitosane) fut ajouté à un herbicide contenant du glyphosate (*RoundUp Weathermax*, 900 g a.i./hectare). Le glyphosate génère des quantités importantes de ERO.

Les traitements sont présentés dans le tableau 2.

Le traitement témoin fut le glyphosate (*RoundUp Weathermax*, 900 g a.i./hectare) appliqué seul. La bouillie obtenue a été appliquée à un taux de 200 litres/hectare. Les traitements ont été effectués entre les stades V3 et V4 du soya. Les traitements ont été répliqués 4 ou 6 fois et, et disposés en blocs complètement randomisés. Les analyses statistiques ont été effectuées avec R 4.2.2³⁶. Une analyse de variance et une comparaison des moyennes obtenues a été faire, utilisant la fonction *TukeyHSD* du programme statistique.



Tableau 2. Liste des traitements dans l'essai groupe 9 soya

N° TRT	Traitement	Classification HRAC (groupe)	Taux d'application	
1	Weedy Control	—	—	—
2	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	adjuvant	0,2	% v/v
3	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	adjuvant	0,2	% v/v
	CropBooster OP	biostimulant	2	l/ha

4.2.3. Essai herbicides + biostimulant dans le maïs

Le CropBooster OP, un biostimulant foliaire (15 % N – 3 % P₂O₅ – 6 % K₂O avec 2 % S, 0,02 % B, 0,05 % Mn, 0,05 % Mo, 0,05 % Zn, 0,5 % EDTA) enrichi avec la technologie Oligo Prime® (0,34 % C-plex®, 0,12 % acide fulvique, 0,25 % signaux métaboliques, 0,1 % chitosane) fut ajouté à des herbicides identifiés comme faisant partie des groupe 5, 15 et 27.

Les herbicides du groupe 5 inhibe la protéine D1 du système photosynthétique II et favorise la production d'une quantité importante de ERO. Les herbicides du groupe 14 inhibent un enzyme (PPO) impliqué dans la photosynthèse. Les herbicides du groupe 15 inhibe la formation d'acides gras; ces herbicides génèrent peu de ERO. Les herbicides du groupe 27 inhibent la production de l'enzyme 4-hydroxyphénylpyruvate dioxygénase

(4-HPPD). Cet enzyme est nécessaire pour la production de caroténoïdes par les plantes. Les herbicides de ces groupes génèrent des quantités importantes de ERO³⁷.

Le tableau 3 présente les traitements effectués dans ces essais.

Les traitements témoins ont été les herbicides appliqués seuls (traitements 2, 4 et 6). La bouillie obtenue a été appliquée à un taux de 200 litres/hectare. Les traitements ont été effectués entre les stades V3 et V8 du maïs. Les traitements ont été répliqués 4 ou 6 fois et disposés en blocs complètement randomisés. Les analyses statistiques ont été effectuées avec R 4.2.2³⁶. Une analyse de variance et une comparaison des moyennes obtenues a été faite, utilisant la fonction *TukeyHSD* du programme statistique.

Tableau 3. Liste des traitements pour l'essai herbicides + biostimulant dans le maïs

N° TRT	Traitement	Classification HRAC (groupe)	Taux d'application	
1	Weedy Control	—	—	—
2	Glyphosate/s-metolachlor/mesotrione	9/15/27	4,2	l/ha
	Atrazine	5	0,6	l/ha
	Agral 90	adjuvant	0,2	% v/v
3	Glyphosate/s-metolachlor/mesotrione	9/15/27	4,2	l/ha
	Atrazine	5	0,6	l/ha
	Agral 90	adjuvant	0,2	% v/v
	CropBooster OP	biostimulant	2	l/ha
4	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Tembotrione (Laudis)	27	65	g a.i./ha
	Atrazine	5	576	g a.i./ha
	Hasten	adjuvant	1,75	l/ha
5	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Tembotrione (Laudis)	27	65	g a.i./ha
	Atrazine	5	576	g a.i./ha
	Hasten	adjuvant	1,75	l/ha
6	S-metolachlor/mesotrione/bicyclopyrone	15/27/27	3,952	l/ha
	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	CropBooster OP	biostimulant	2	l/ha
7	S-metolachlor/mesotrione/bicyclopyrone	15/27/27	3,952	l/ha
	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	CropBooster OP	biostimulant	2	l/ha
8	S-metolachlor/atrazine	15/5	3,5	l/ha
	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Saflufenacil	14	75	g a.i./ha
9	S-metolachlor/atrazine	15/5	3,5	l/ha
	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Saflufenacil	14	75	g a.i./ha
	CropBooster OP	biostimulant	2	l/ha

4.2.4. Essai herbicides + biostimulant dans le soya

Le CropBooster OP, un biostimulant foliaire (15 % N – 3 % P₂O₅ – 6 % K₂O avec 2 % S, 0,02 % B, 0,05 % Mn, 0,05 % Mo, 0,05 % Zn, 0,5 % EDTA) enrichi avec la technologie Oligo Prime® (0,34 % C-plex®, 0,12 % acide fulvique, 0,25 % signaux métaboliques, 0,1 % chitosane) fut ajouté à des herbicides identifiés couramment utilisés dans la production de soya. Le glyphosate est un herbicide du groupe 9. Le chlorimuron-ethyl est un herbicide de groupe 2 ; ce groupe d'herbicides inhibe la production d'enzymes ALS, stoppant la production d'acides aminés. Les herbicides du groupe 4 régulent certains gènes responsables de la production d'auxine.

Les herbicides du groupe 14 inhibent un enzyme (PPO) impliqué dans la photosynthèse. Les herbicides des groupes 2, 4, 9 et 14 génèrent des quantités importantes de ERO.

Le tableau 4 présente les traitements effectués.

Les traitements témoins ont été les herbicides appliqués seuls (traitements 2, 4 et 6). La bouillie obtenue a été appliquée à un taux de 200 litres/hectare. Les traitements ont été effectués entre les stades V3 et V4 du soya. Les traitements ont été répliqués 4 ou 6 fois et, et disposés en blocs complètement randomisés. Les analyses statistiques ont été effectuées avec R 4.2.2³⁶. Une analyse de variance et une comparaison des moyennes obtenues a été faite, utilisant la fonction *TukeyHSD* du programme statistique.

Tableau 4. Liste des traitements pour l'essai herbicides + biostimulant dans le soya

N° TRT	Traitement	Classification HRAC (groupe)	Taux d'application	
1	Weedy Control	—	—	—
2	Chlorimuron-ethyl	2	9	g a.i./ha
	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	adjuvant	0,2	% v/v
3	Chlorimuron-ethyl	2	9	g a.i./ha
	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	adjuvant	0,2	% v/v
	CropBooster OP	biostimulant	2	l/ha
4	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	2,4-D choline	4	817	g a.i./ha
	Agral 90	adjuvant	0,2	% v/v
5	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	2,4-D choline	4	817	g a.i./ha
	Agral 90	adjuvant	0,2	% v/v
	CropBooster OP	biostimulant	2	l/ha
6	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Fomesafen	14	240	g a.i./ha
	Turbocharge	adjuvant	0,25	% v/v
7	Glyphosate	9	900	g a.i./ha
	Fomesafen	14	240	g a.i./ha
	Turbocharge	adjuvant	0,25	% v/v
	CropBooster OP	biostimulant	2	l/ha

5.1. Essai glyphosate (groupe 9) dans le maïs

L'objectif de cet essai était de vérifier l'effet de la technologie Oligo Prime® sur le rendement du maïs, lorsqu'utilisé en mélange avec du glyphosate. Le rendement obtenu lorsque le glyphosate a été appliqué avec le CropBooster OP a été significativement plus élevé que lorsque le glyphosate a été appliqué seul. La différence observée a été de 752 kg/ha (12 bu/acre).

L'impact positif de la technologie Oligo Prime® a été confirmé sur tous les sites et à toutes les années.

Maïs						
	2018 (kg/ha)	2019 (kg/ha)	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Moyenne 2018-2023 (kg/ha)
Glyphosate seul	12 247	6091	11 359	17 869	15 723	12 890
Glyphosate avec CropBooster OP	13 585	6975	11 404	18 437	16 069	13 641
Effet de la technologie CropBooster OP	1338	884	46	568	346	752

Maïs						
	2018 (kg/ha)	2019 (kg/ha)	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Moyenne 2018-2023 (kg/ha)
Glyphosate avec CropBooster OP	13 585	6975	11 404	18 437	16 069	13 641
Beloeil	11 974	6975	11 404	—	—	10 118
Bright	—	—	—	18 437	14 698	16 567
Winchester ECD	14 659	—	—	—	—	14 659
Winchester UOG	—	—	—	—	17 898	17 898
Glyphosate seul	12 247	6091	11 359	17 869	15 723	12 890
Beloeil	11 740	6091	11 359	—	—	9730
Bright	—	—	—	17 869	14 497	16 183
Winchester ECD	12 584	—	—	—	—	12 584
Winchester UOG	—	—	—	—	17 358	17 358

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Traitement	1	8189803.066	8189803.066	7.450628475	0.0091	**
Annee_Site	6	727832191.1	121305365.2	110.3568915	7.37699E-25	***
Traitement x Annee_Site	6	7557709.135	1259618.189	1.145930747	0.3523	ns
Residuals	44	48365226.65	1099209.697	NA	NA	

5.2. Essai glyphosate (groupe 9) dans le soya

L'objectif de cet essai était de vérifier l'effet de la technologie Oligo Prime® sur le rendement du soya, lorsqu'utilisé en mélange avec du glyphosate. Le rendement obtenu lorsque le glyphosate a été appliqué avec le CropBooster OP a été plus élevé que lorsque le glyphosate a été appliqué seul. La différence observée a été de 107 kg/ha (1,6 bu/acre). Cette différence n'est pas significative. Les difficultés rencontrées par la culture de soya en 2022 et 2023 expliquent ces résultats.

Soya						
	2018 (kg/ha)	2019 (kg/ha)	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Moyenne 2018-2023 (kg/ha)
Glyphosate sans CropBooster OP	3530	3883	6603	3510	4642	4434
Glyphosate avec CropBooster OP	3665	4038	6786	3566	4653	4541
Effet de la technologie CropBooster OP	135	155	183	55	11	107

ns

Soya						
	2018 (kg/ha)	2019 (kg/ha)	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Moyenne 2018-2023 (kg/ha)
Glyphosate avec CropBooster OP	3665	4038	6786	3566	4653	4541
Beloeil	3261	4038	6786	—	—	4695
Bright	—	—	—	3566	4193	3879
St-Augustin	2546	—	—	—	—	2546
Winchester ECD	4680	—	—	—	—	4680
Winchester UOG	—	—	—	—	5113	5113
Glyphosate sans CropBooster OP	3530	3883	6603	3510	4642	4434
Beloeil	3146	3883	6603	—	—	4604
Bright	—	—	—	3510	4062	3786
St-Augustin	2459	—	—	—	—	2459
Winchester ECD	4718	—	—	—	—	4718
Winchester UOG	—	—	—	—	5222	5222

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Traitement	1	12304.98	12304.98	0.241625	0.625275	ns
Annee_Site	7	91218552	13031222	255.8862	9.47E-36	***
Traitement:Annee_Site	7	142277.8	20325.4	0.399118	0.898154	ns
Residuals	48	2444441	50925.85	NA	NA	

5.3. Essai herbicides + biostimulant dans le maïs

L'objectif de cet essai était de vérifier l'effet de la technologie Oligo Prime® sur le rendement du maïs, lorsqu'utilisé en mélange avec herbicides générant des concentrations élevées de ERO. Le rendement obtenu lorsque ces herbicides ont été appliqués avec le CropBooster OP ont été plus élevés que lorsque ces herbicides ont été appliqués seuls. La différence observée a été de 658 kg/ha (10,5 bu/acre). Cette différence est significative.

Ces différences positives se sont répétées tous les ans et sur tous les sites.

La comparaison des rendements obtenus lorsque soumis à des programmes herbicides différents n'est pas significative. Il n'y a pas d'interaction entre les herbicides et les traitements de biostimulants.

Maïs				
	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Moyenne 2021-2023 (kg/ha)
Herbicide sans CropBooster OP	12 390	7487	16 094	12 039
Herbicide avec CropBooster OP	15 785	8101	16 505	12 698
Effet de la technologie CropBooster OP	3395	613	411	658

Maïs				
	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Moyenne 2021-2023 (kg/ha)
Herbicide avec CropBooster OP	15 785	8101	16 505	12 698
Glyphosate + tembotrione (Laudis) + atrazine (Aatrex)	15 894	8125	16 672	12 786
Mesotrione/s-metolachlor/atrazine/bicyclopyrone (Acuron) + glyphosate	16 427	8003	16 571	12 858
S-metolachlor/mesotrione/glyphosate (Halex GT) + atrazine	15 034	8175	16 273	12 448
Herbicide sans CropBooster OP	12 390	7487	16 094	12 039
Glyphosate + tembotrione (Laudis) + atrazine (Aatrex)	10 211	—	16 518	12 152
Mesotrione/s-metolachlor/atrazine/bicyclopyrone (Acuron) + glyphosate	15 821	7802	15 620	12 327
S-metolachlor/mesotrione/glyphosate (Halex GT) + atrazine	13 861	7173	16 144	11 647

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	1	8995514.355	8995514.355	7.771923578	0.006719979
Traitementherbicide	2	4557692.492	2278846.246	1.968872281	0.1467643666
Annee_Site	2	1319227604	659613802.2	569.8915992	4.43E-46
Traitement:Traitementherbicide	2	563533.3052	281766.6526	0.243440097	0.784543447
Residuals	75	86807798.59	1157437.315	NA	NA

5.4. Essai herbicides + biostimulant dans le soya

L'objectif de cet essai était de vérifier l'effet de la technologie Oligo Prime® sur le rendement du soya, lorsqu'utilisé en mélange avec herbicides générant des concentrations élevées de ERO. Le rendement obtenu lorsque ces herbicides ont été appliqués avec le CropBooster OP ont été plus élevés que lorsque ces herbicides ont été appliqués seuls. La différence observée a été de 167 kg/ha (2,5 bu/acre). Cette différence est significative.

Ces différences positives se sont répétées en 2021 et 2022, mais pas en 2023.

La comparaison des rendements obtenus lorsque soumis à des programmes herbicides différents est significative. Il ressort de cette analyse que certains programmes herbicides ont permis d'obtenir de meilleurs rendements. L'interaction entre les herbicides et les traitements de biostimulants n'est pas significative.

Soya				
	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Moyenne 2021-2023 (kg/ha)
Herbicide sans CropBooster OP	4347	3130	4822	4181
Herbicide avec CropBooster OP	4594	3364	4751	4349
Effet de la technologie CropBooster OP	247	233	-72	167

Soya				
	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Moyenne 2021-2023 (kg/ha)
Herbicide avec CropBooster OP	4594	3364	4751	4349
S-metolachlor/metribuzin (Boundary LQD) + glyphosate	4222	—	—	4222
Fomesafen/glyphosate (Flexstar)	4732	3296	4713	4333
Chlorimuron-ethyl (Classic) + glyphosate	4734	3431	4301	4203
2,4-D choline (Enlist)	—	—	5277	5277
Herbicide sans CropBooster OP	4347	3130	4822	4181
S-metolachlor/metribuzin (Boundary LQD) + glyphosate	4194	—	—	4194
Fomesafen/glyphosate (Flexstar)	4492	3130	4784	4171
Chlorimuron-ethyl (Classic) + glyphosate	4316	3130	4180	3890
2,4-D choline (Enlist)	—	—	5523	11 647
Effet de la technologie CropBooster OP	247	233	-72	167

**

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	1	685634.2325	685634.2325	8.279121954	0.005056829
Traitement:herbicide	3	12068772.14	4022924.046	48.57732768	1.84E-18
Annee_Site	4	53164980.56	13291245.14	160.4935025	5.04E-39
Traitement:Traitement:herbicide	3	607333.7567	202444.5856	2.44454453	0.069449722
Residuals	86	7122076.994	82814.84877	NA	NA



CONCLUSION

6

Selon l'évaluation de l'impact des stress biotiques et abiotiques effectuée par Buchanan *et al.* (2000), les rendements des cultures n'atteignent en moyenne que 18 % de leur rendement théorique maximal. Puisque les pertes de rendement associées aux stress *abiotiques* se situent entre 66 % et 82 % contre 5 à 10% pour les stress *biotiques*, l'augmentation de la productivité des cultures ne peut faire abstraction des stress abiotiques (environnementaux)⁵.

Bien entendu, les agriculteurs ne peuvent pas contrôler la fréquence et l'amplitude des stress environnementaux qui touchent les plantes et les cultures.

L'introduction relativement récente de biostimulants comme ceux offerts par la technologie Oligo Prime® permet d'envisager une réduction des impacts négatifs causés par les stress abiotiques sur les rendements.

En travaillant avec la plante, la technologie Oligo Prime® permet de stimuler et d'augmenter l'efficacité des mécanismes de défense naturels présents dans toutes les plantes et ainsi donner une meilleure chance d'atteindre et de maximiser le plein potentiel génétique de production des cultures.

Les résultats obtenus dans les divers essais menés sur des champs de maïs et de soya, nous permettent de tirer ces principales conclusions.

- ① **Efficacité.** Les essais menés entre 2018 et 2023 ont permis de démontrer l'efficacité de la technologie Oligo Prime® lorsqu'utilisée dans le CropBooster OP.
- ② **Impact de la technologie Oligo Prime®.** Les différences de rendement observées s'expliquent par l'impact de la technologie sur la photosynthèse et sur l'augmentation de la concentration des protéines et enzymes nécessaires pour réduire la concentration des ERO dans les cultures.

Les essais seront poursuivis en 2024.

La technologie Oligo Prime® est donc un outil efficace à la disposition des agriculteurs. Et ne perdons jamais de vue que l'objectif est d'améliorer la capacité des cultures à tolérer les stress abiotiques en utilisant des biostimulants qui réduiront l'impact des stress abiotiques sur le rendement des cultures. Et une hausse de rendement des cultures permettra de mieux répondre à l'augmentation de la demande alimentaire moyenne par personne de 40 % d'ici 2030¹.

N'est-ce pas notre but commun à toutes et à tous...



BIBLIOGRAPHIE

7

- 1 OCDE et ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE. *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2021-2030*. (OECD, 2021). doi:10.1787/e32fb104-fr.
- 2 AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. Document de discussion: Réduction des émissions découlant de l'application d'engrais dans le secteur agricole canadien. <https://agriculture.canada.ca/fr/ministere/transparence/recherche-opinion-publique-consultations/faites-connaître-vos-idees-reduction-emissions-attribuables-aux-engrais/discussion> (2022).
- 3 GIAMPIERI, F. *et al.* Organic vs conventional plant-based foods: A review. *Food Chem.* 383, (2022).
- 4 LOBELL, D. B., CASSMAN, K. G. et FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34, 179–204 (2009).
- 5 BUCHANAN, B. B., GRUISSEM, W. et JONES, R. L. Biochemistry and Molecular Biology of Plants. *American Society of Plant Physiologists*, Rockville, Md., (2000).
- 6 CALVO, P., NELSON, L. et KLOEPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil* 383, 3–41 (2014).
- 7 du JARDIN, P. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Sci. Hort.* 196, 3–14 (2015).
- 8 HALEY, O. The Role of a Foliar Nutrient Product in Relieving Herbicide-Induced Defects in Crop Growth and Development in Zea mays, Triticum aestivum, and Glycine max. McGill University, Montreal, Qc, (2017.)
- 9 PALL, A. Mitigation of Glyphosate-Induced Plant Stress in Soybean Using Salicylic Acid - ProQuest. McGill University, Montreal, Qc, (2019).
- 10 KUMAR, S. Abiotic Stresses and Their Effects on Plant Growth, Yield and Nutritional Quality of Agricultural Produce. *Int. J. Food Sci. Agric.* 4, 367–378 (2020).
- 11 GULL, A. *et al.* *Biotic and Abiotic Stresses in Plants. Abiotic and Biotic Stress in Plants* (IntechOpen, 2019). doi:10.5772/intechopen.85832.
- 12 BLUMWALD, E. Abiotic Stress. in *Plant physiology and development* (eds. Taiz, L. et Zeiger, Eduardo) Sinauer associates, Sunderland, Massachusetts, (2018).
- 13 BEN-ARI, G. et LAVI, U. 11 - Marker-assisted selection in plant breeding. in *Plant Biotechnology and Agriculture* (eds. Altman, A. & Hasegawa, P. M.) 163–184 (Academic Press, San Diego, 2012). doi:10.1016/B978-0-12-381466-1.00011-0.
- 14 DAS, K. et ROYCHOUDHURY, A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Front. Environ. Sci.* 2, (2014).
- 15 PARENT, C., CAPELLI, N. et DAT, J. Formes réactives de l'oxygène, stress et mort cellulaire chez les plantes. *C. R. Biol.* 331, 255–261 (2008).
- 16 HASANUZZAMAN, M. *et al.* Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. *Antioxidants* 9, 681 (2020).
- 17 HALLIWELL, B. Reactive Species and Antioxidants. Redox Biology Is a Fundamental Theme of Aerobic Life. *Plant Physiol.* 141, 312–322 (2006).
- 18 HATZ, S., LAMBERT, J. D. C. et OGILBY, P. R. Measuring the lifetime of singlet oxygen in a single cell: addressing the issue of cell viability. *Photochem. Photobiol. Sci.* 6, 1106–1116 (2007).
- 19 GILL, S. S. et TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem.* 48, 909–930 (2010).
- 20 CHOUDHURY, F. K., RIVERO, R. M., BLUMWALD, E. et MITTLER, R. Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *Plant J.* 90, 856–867 (2017).

- 21 SACHDEV, S., ANSARI, S. A., ANSARI, M. I., FUJITA, M. et HASANUZZAMAN, M. Abiotic Stress and Reactive Oxygen Species: Generation, Signaling, and Defense Mechanisms. *Antioxidants* 10, 277 (2021).
- 22 SINGH, D. Juggling with reactive oxygen species and antioxidant defense system - A coping mechanism under salt stress. *Plant Stress* 5, 100093 (2022).
- 23 AHMAD, P., SARWAT, M. et SHARMA, S. Reactive oxygen species, antioxidants and signaling in plants. *J. Plant Biol.* 51, 167-173 (2008).
- 24 PELÁEZ-VICO, M. Á. *et al.* ROS and redox regulation of cell-to-cell and systemic signaling in plants during stress. *Free Radic. Biol. Med.* 193, 354-362 (2022).
- 25 FOYER, C. H. *et al.* On the move: redox-dependent protein relocation in plants. *J. Exp. Bot.* 71, 620-631 (2020).
- 26 DEVIREDDY, A. R., ARBOGAST, J. et MITTLER, R. Coordinated and rapid whole-plant systemic stomatal responses. *New Phytol.* 225, 21-25 (2020).
- 27 FICHMAN, Y. et MITTLER, R. Rapid systemic signaling during abiotic and biotic stresses: is the ROS wave master of all trades? *Plant J.* 102, 887-896 (2020).
- 28 GILROY, S. *et al.* A tidal wave of signals: calcium and ROS at the forefront of rapid systemic signaling. *Trends Plant Sci.* 19, 623-630 (2014).
- 29 LV, Z.-Y. *et al.* Phytohormones jasmonic acid, salicylic acid, gibberellins, and abscisic acid are key mediators of plant secondary metabolites. *World J. Tradit. Chin. Med.* 7, 307 (2021).
- 30 MITTLER, R., ZANDALINAS, S. I., FICHMAN, Y. et VAN BREUSEGEM, F. Reactive oxygen species signalling in plant stress responses. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 23, 663-679 (2022).
- 31 CARVALHO, S. J. P. DE, NICOLAI, M., FERREIRA, R. R., FIGUEIRA, A. V. de O. et CHRISTOFFOLETI, P. J. Herbicide selectivity by differential metabolism: considerations for reducing crop damages. *Sci. Agric.* 66, 136-142 (2009).
- 32 DEVINE, M.D., DUKE, S.O. et FEDTKE, C. Physiology of Herbicide Action. *Weed Technol.* 8, 418-419 (1994).
- 33 SMITH, D.L. *Minimizing Crop Stress with Micronutrients: Mechanisms and Technologies.* (2018).
- 34 HIDANGMAYUM, A., DWIVEDI, P., KATIYAR, D. et HEMANTARANJAN, A. Application of chitosan on plant responses with special reference to abiotic stress. *Physiol. Mol. Biol. Plants* 25, (2019).
- 35 MUKARRAM, M. *et al.* Chitosan-induced biotic stress tolerance and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. *Front. Plant Sci.* 14, (2023).
- 36 R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing. (2013).
- 37 CAVERZAN, A., PIASECKI, C., CHAVARRIA, G., STEWART, C. N. et VARGAS, L. Defenses Against ROS in Crops and Weeds: The Effects of Interference and Herbicides. *Int. J. Mol. Sci.* 20, 1086 (2019).