

Le potentiel des technologies de pulvérisation intelligente : état des lieux et perspectives en grandes cultures

Sandra Flores-Mejia, Ph.D.
Chercheuse en malherbologie
CÉROM

Les Webinaires Grandes cultures du MAPAQ
4 avril 2025



Crédit photo: fotokostk



Table des matières

1. Introduction
2. Différentes méthodes d'acquisition d'images et l'évolution des algorithmes de détection des mauvaises herbes
3. Intégration au champ : cartes de prescription et pulvérisateurs intelligents
4. Défis et perspectives
5. Conclusion

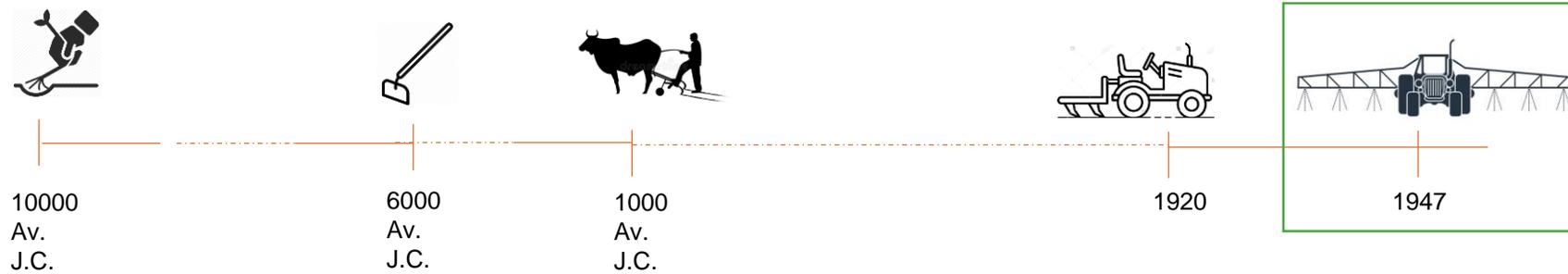
1. Introduction



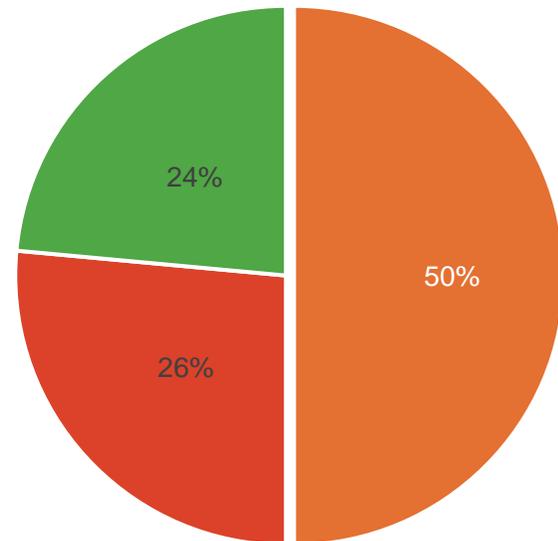
Crédit photo: fotokostk



La Bataille contre les mauvaises herbes (MH)



Pertes mondiales en rendement selon le type d'ennemis des cultures



■ Mauvaises herbes ■ Insectes ■ Maladies

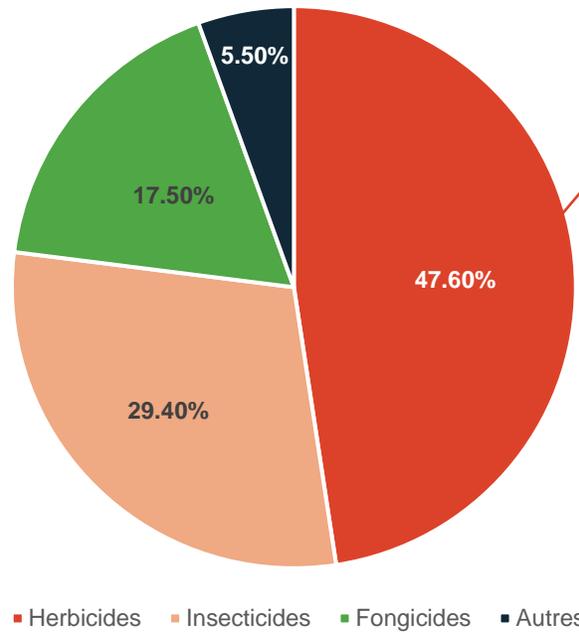
L'impact des MH sur l'économie des É.-U. dépasse les **20 milliards de dollars par année.**

- Perte de rendement
- Augmentation des coûts de production
- Compétition pour les ressources (nutriments, eau, etc.)

Herbicides

Sont conçus pour lutter contre plus de 90 % des mauvaises herbes sensibles aux herbicides

Proportions mondiales des ventes de produits phytosanitaires par catégorie



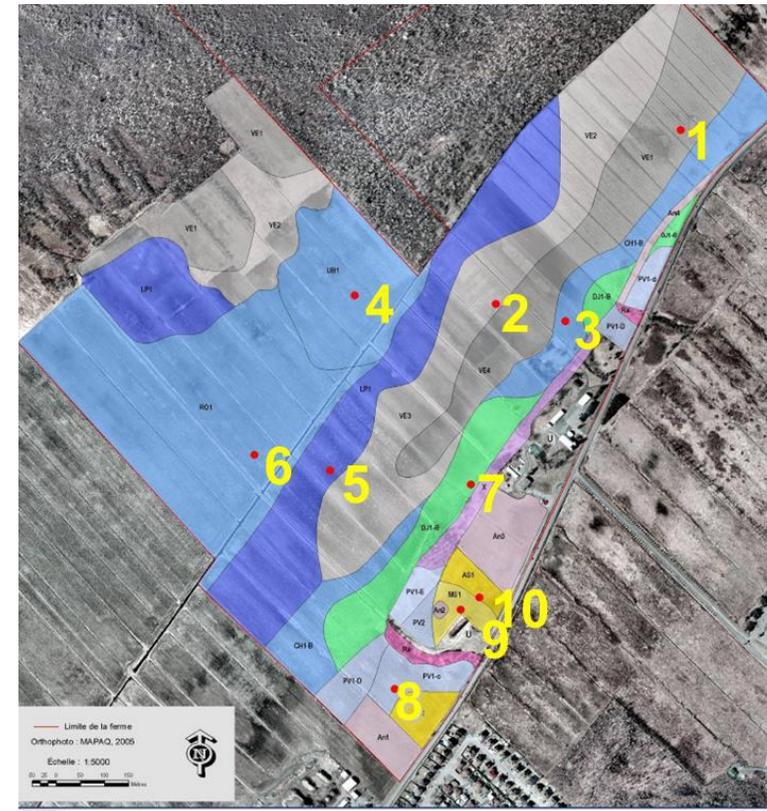
Au Québec : les herbicides représentent 68 % de tous les pesticides vendus pour l'ensemble de la province. Glyphosate = 59 %

- Le PAD (2020-2030) vise à réduire l'usage des pesticides et les risques qui y sont associés.

Gestion des mauvaises herbes spécifique au site (GMHSS) (*Site-specific weed management*)

- ❖ La GMHSS est une approche d'agriculture de précision qui se concentre sur le contrôle des mauvaises herbes en ciblant des zones spécifiques dans le but de réduire l'utilisation d'herbicides et d'améliorer leur efficacité.
- ❖ La GMHSS doit être ajustée selon :
 - La topographie,
 - Les caractéristiques du sol (% de matière organique, pH, texture, etc.)
 - L'abondance des MH.

La GMHSS est à l'échelle de la ferme ou du champ



Orthophoto : MAPAQ, 2005
Échelle : 1:5000
Prospection et cartographie des sols : Gilles Gagné, Michaël Leblanc
Mise en carte : Yves Lemay
Avril 2006

Crédit photo: É.Smédbol (IRDA)

Avantages de la GMHSS

La GMHSS s'aligne avec les objectifs du PAD



2. Différentes méthodes d'acquisition d'images et l'évolution des algorithmes pour la détection des mauvaises herbes



CÉROM

Centre de recherche sur les grains

Flux de travail pour développer la GMHSS

1. Choisir la plateforme de collecte de données



Au sol



Téledétection

1. Choisir la plateforme de collecte de données



Crédit photo: É. Smédbol (IRDA)



1. Choisir la plateforme de collecte de données



- Images en haute résolution
- Peut être intégrée à l'opération de désherbage (ex. See and Spray)
- Doit bénéficier d'un désherbage en amont



- Compromis entre la résolution et le temps pour faire le dépistage
- Permet de faire la GMHSS (ex. cartes de prescription)
- N'est pas intégrée à l'opération de désherbage



- Plateformes gratuites ou payantes
- Couvre une grande superficie
- Archive des images des années précédentes
- Résolution variable selon la plateforme (jusqu'à 0.5 m)

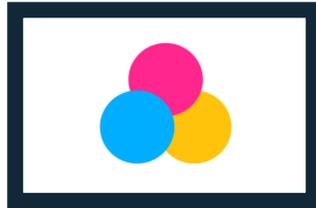
Flux de travail pour développer la GMHSS

1. Choisir la plateforme de collecte de données

2. Choisir le type de capteur



Au sol



Visible / RGB



Téledétection



Spectral,
multi-spectral,
hyperspectral

2. Choisir le type de capteur



Visible / RGB

- Il faut bien réfléchir : Quel est mon objectif?
 - Compter le nombre de plantes,
 - Différencier les MH de la culture,
 - Évaluer le % de recouvrement,
 - Obtenir la biomasse, etc.
- Capteur RGB (lumière visible) :
 - Images prises avec des caméras traditionnelles.
 - Le plus utilisé.
 - Les images servent à entraîner des algorithmes à partir d'images digitales afin d'arriver à une identification.
 - Une grande quantité d'images est nécessaire pour entraîner les algorithmes, surtout pour différencier des espèces partageant de nombreuses similarités.



Crédit photo : GROW IWM. <https://youtu.be/dG52PDuMvMg?si=VmGHvSNKYhHMEVww>

2A. Élaboration de la banque d'images



Visible / RGB

- La banque d'images doit contenir des images :
 - Différents stades phénologiques (MH et de la culture);
 - Différents biotypes;
 - Prises à différentes heures et sous différentes conditions climatiques (soleil, nuages...)
 - Inclure des plantes soumises à différents stress
- Coût relativement faible (équipement); c'est la création de la banque d'images qui peut être très dispendieuse.
 - *National image repository (NAIR) & Benchbot*
 - D'autres banques d'images sont également disponibles



Bench bot

Crédit photo: Précisionsustainableag.org

2A. Traitement des images



Visible / RGB

Sétaire verte



Crédit photo: Ag Image Repository. Précision Sustainable Agriculture.

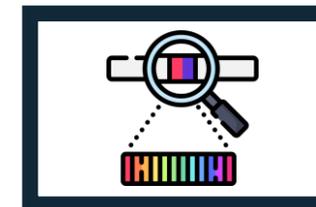
Chénopode blanc



Crédit photo: Ag Image Repository. Précision Sustainable Agriculture.

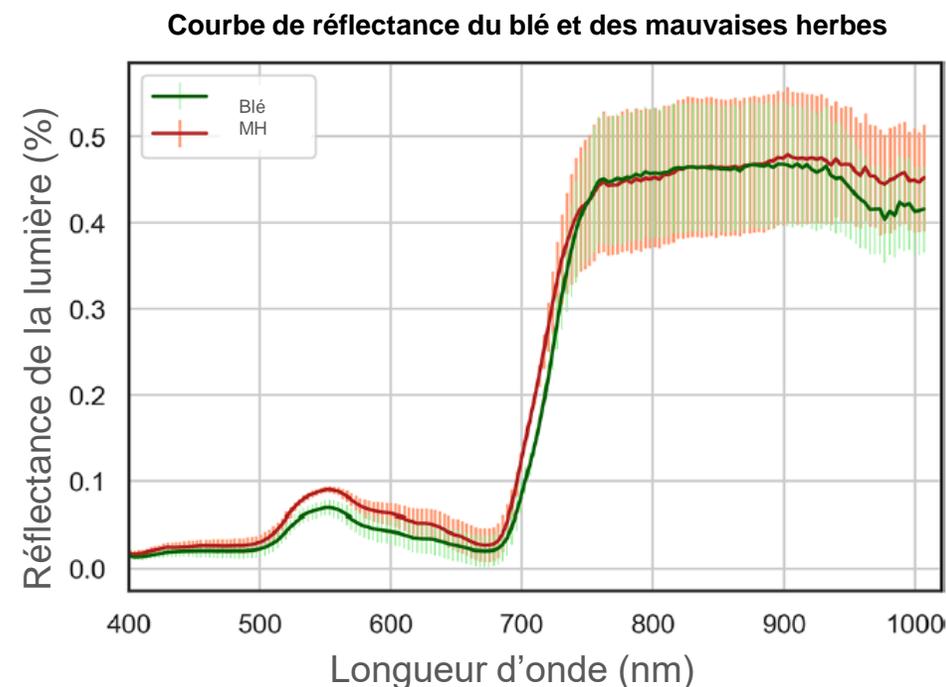
1. Traitement des images pour améliorer la qualité et supprimer le bruit
2. Extraction des caractéristiques (couleur, texture, forme, taille...) afin de différencier les cultures des MH.

2. Choisir le type de capteur



Spectral,
multi-spectral,
hyperspectral

- Prise avec caméras multispectrales ou hyperspectrales.
 - Multispectrale : 3-7 bandes d'environ 100 nm de large
 - Hyperspectrale : bandes d'environ 1.9-10 nm.
- Différents indices de végétation (ex. NDVI) peuvent être utilisés.
- Chaque espèce possède une signature spectrale unique, qui varie selon le stade phénologique.
 - Différencier les MH de la culture serait, en théorie, plus facile avec la signature spectrale plutôt qu'avec une identification de la 'forme' de la plante, mais cela n'est pas toujours le cas.
 - Dans certains cas, il a été possible d'obtenir une signature spectrale pour des biotypes sensibles et résistants au glyphosate (amarante de Palmer, ray-grass italien, kochia) et au dicamba (kochia)



Modifié d'après : Liu et al. (2024)

Flux de travail pour développer la GMHSS

1. Choisir la plateforme de collecte de données

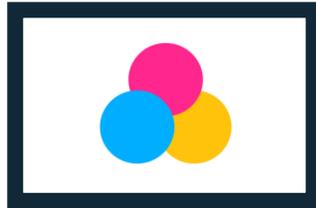


Au sol



Téledétection

2. Choisir le type de capteur



Visible / RGB



Spectral,
multi-spectral,
hyperspectral

3. Choisir la plateforme d'analyse



Ordinateur

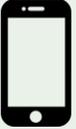


Cellulaire



Nuage

3.Choisir la plateforme d'analyse

	Puissance de traitement des données	Stockage des données	Connectivité	Portabilité	Coût	Entretien	Sécurité
	+++	++	Wi-Fi & cloud	No	L'investissement initial en matériel peut être élevé.	Régulier (équipement et logiciels)	Dépend des protocoles locaux.
	+	+	Réseau cellulaire & Wi-Fi. Accès aux données en temps réel & mises à jour.	Oui	Coût initial inférieur, mais peut entraîner des frais d'utilisation de données.	Mises à jour.	Peut être un problème.
	+ à +++	+++	Accès partout ou il y a un accès internet.	Oui	Modèle basé sur l'abonnement, coûts à long terme potentiellement plus élevés.	Géré par les fournisseurs.	Dépend des politiques et pratiques du fournisseur.

Flux de travail pour développer la GMHSS

1. Choisir la plateforme de collecte de données

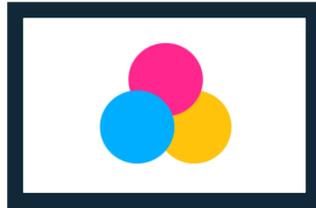


Au sol

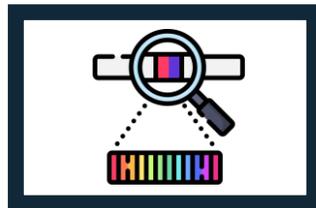


Téledétection

2. Choisir le type de capteur



Visible / RGB



Spectral,
multi-spectral,
hyperspectral

3. Choisir la plateforme d'analyse



Ordinateur

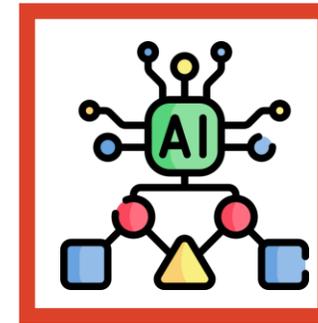


Cellulaire



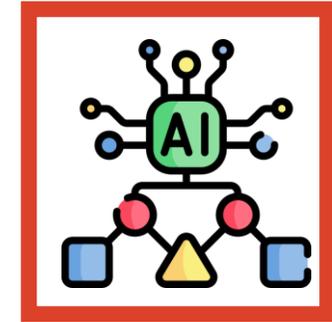
Nuage

4. Analyser les données



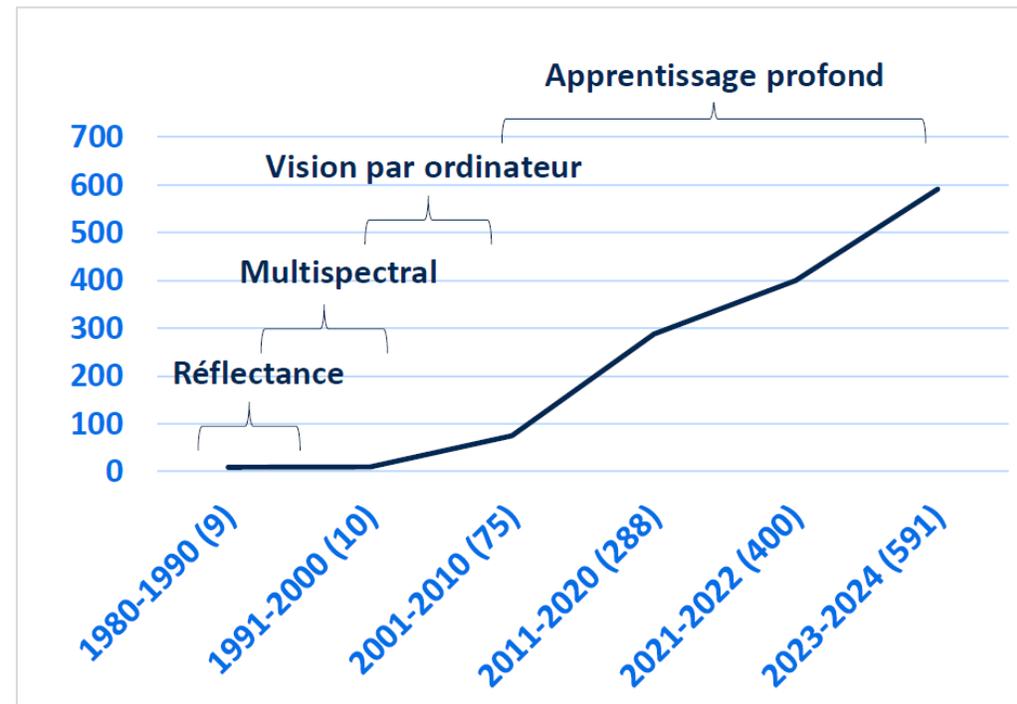
Algorithmes

4. Analyser les données



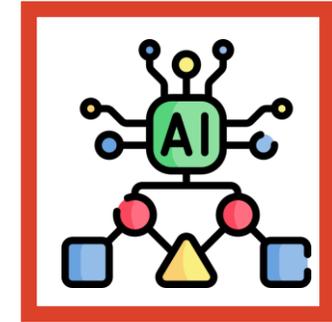
Algorithmes

Avancement des algorithmes pour identifier les MH depuis les années 1970



Crédit photo: É. Smédbol (2024) adapté de Hasan et al (2021)

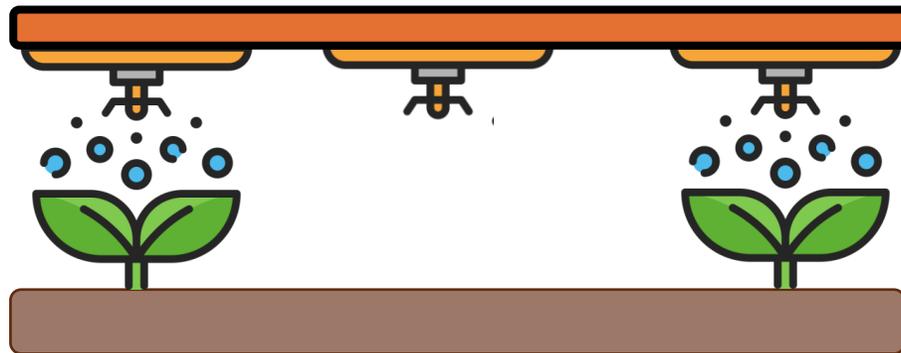
4. Analyser les données



Algorithmes

Réflectance

- L'identification des mauvaises herbes basée sur la réflectance utilise des capteurs pour mesurer la lumière réfléchiée par les surfaces des plantes.
- Différentes plantes réfléchissent la lumière différemment en raison de variations dans leurs propriétés spectrales, telles que la teneur en chlorophylle et la structure des feuilles.

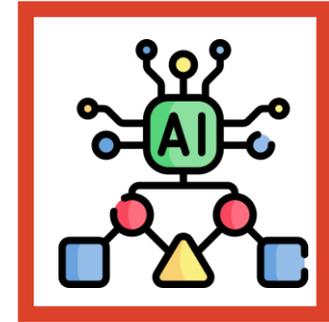


« vert contre brun »



« vert contre vert »

4. Analyser les données



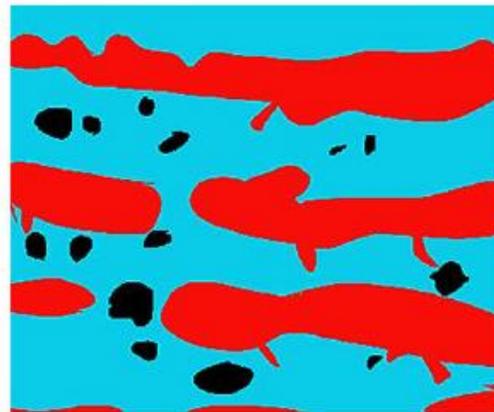
Algorithmes

Réflectance (multispectral)

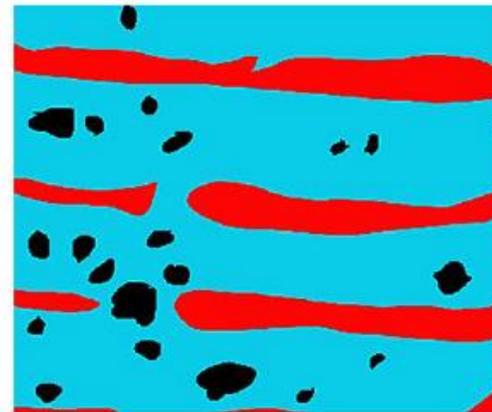
■ Wheat ■ Weed ■ Land



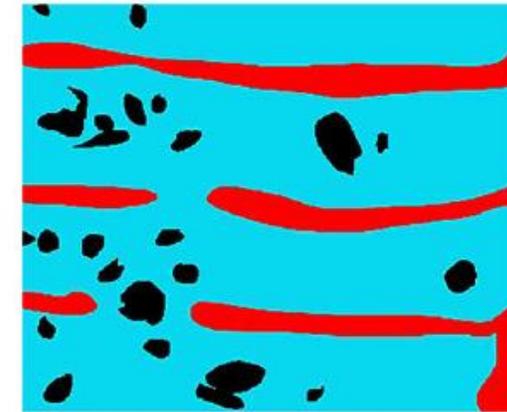
Original Image



DeepLabV3+

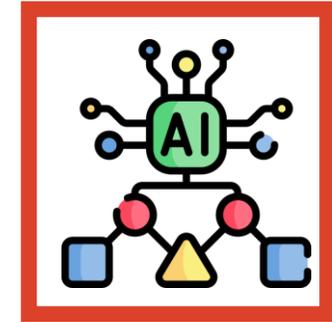


Unet



ResNet-38

4. Analyser les données

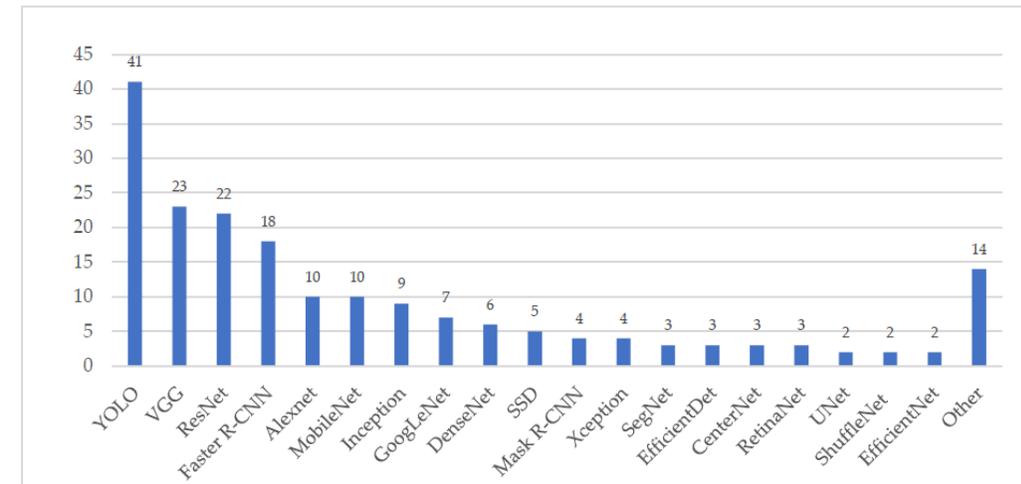


Algorithmes

Vision par ordinateur

- Classification, utilisant différents types d'algorithmes (*random forest*), réseaux de neurones artificiels (*artificial neural networks*) et les réseaux de neurones convolutifs (*convolutional neural networks*), incluant l'architecture YOLO.
- Facteurs à considérer :
 - Taille de la base de données disponible pour entraîner l'algorithme.
 - Besoins de ressources de calculs importantes, qui peuvent limiter l'utilisation.
 - Équipement nécessaire (ordinateur vs cellulaire).
 - Restrictions liées au temps pour la prise de décision : millisecondes (ex. pulvérisateur intégrée) ou des jours (ex. carte de prescription).

La fréquence d'utilisation des différentes architectures des réseaux de neurones convolutifs (CNN) repérés dans l'étude de Garcia-Navarrete et coll. (2024)



Crédit photo: Garcia-Navarrete et coll. (2024).

Flux de travail pour développer la GMHSS

1. Choisir la plateforme de collecte de données

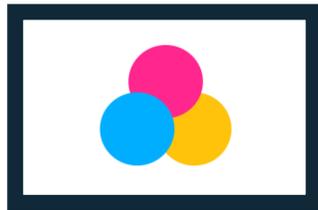


Au sol



Téledétection

2. Choisir le type de capteur & bâtir une banque d'images



Visible / RGB



Spectral,
multi-spectral,
hyperspectral

3. Choisir la plateforme d'analyse



Ordinateur

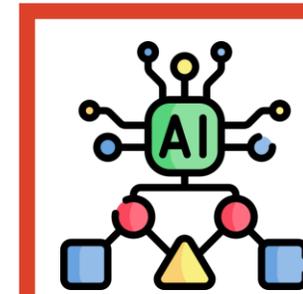


Cellulaire



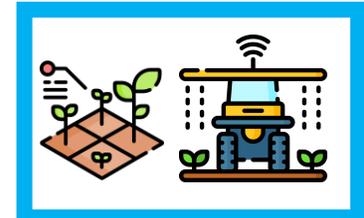
Nuage

4. Analyser les données

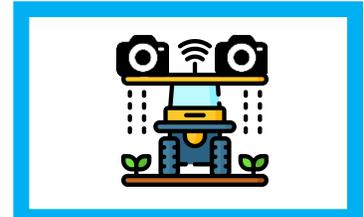


Algorithmes

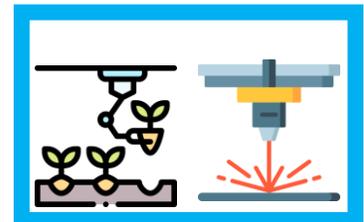
5. Intervention au champ



Cartes de prescription



Pulvérisateur intelligent

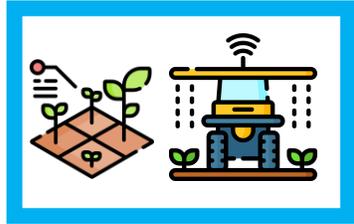


Autres technologies

3. Intégration au champ : cartes de prescription et pulvérisateurs intelligents

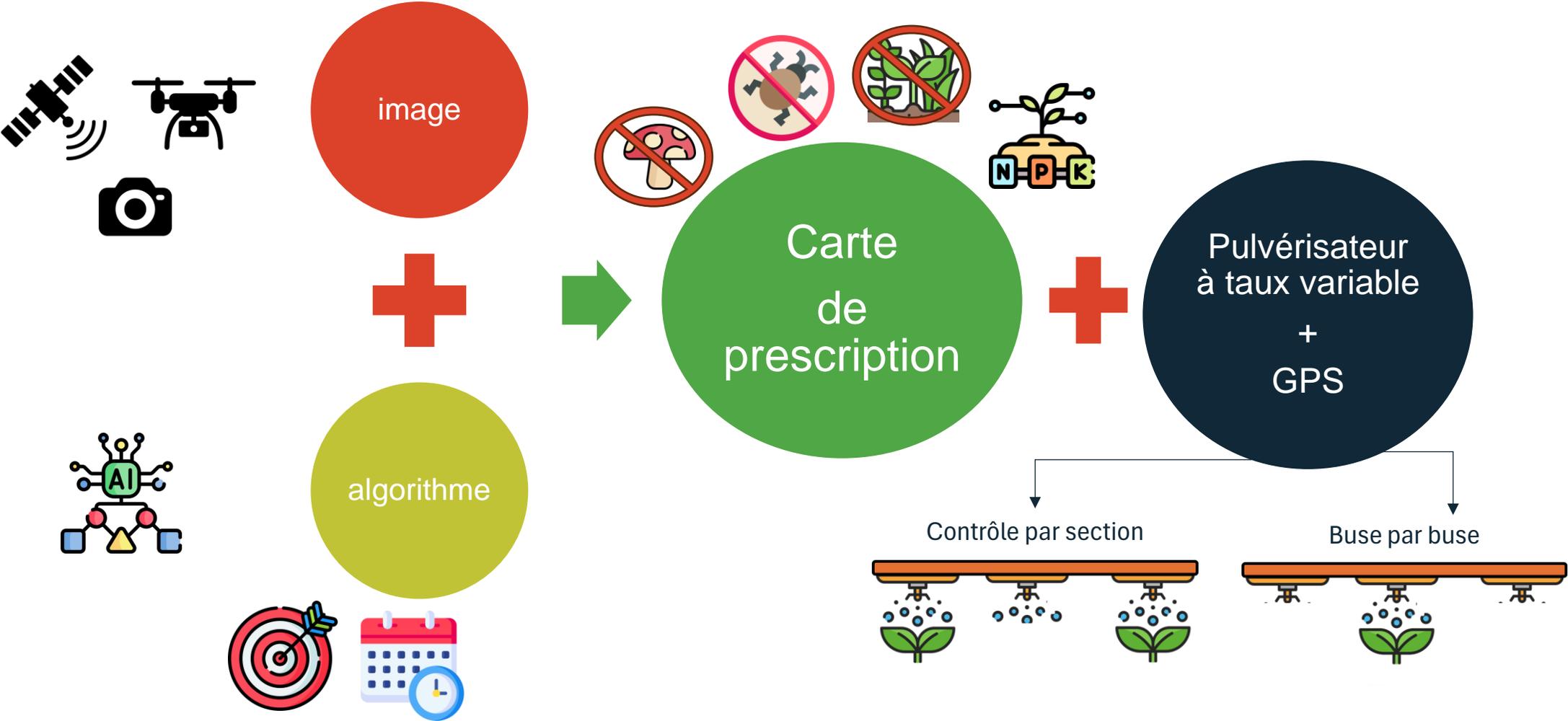


Crédit photo: fotokostk



Cartes de prescription

5a. Cartes de prescription



5a. Cartes de prescription pour les MH

Aux É.-U.

- ❖ Taranis (<https://www.taranis.com/>)
- ❖ Intelinair (<https://www.intelinair.com>)
- ❖ Pix4D (<https://www.pix4d.com/>)
 - ID des phragmites (Wisconsin, É.-U).
 - 2 000 acres en 2.5 jours.
 - Application localisée avec drone (DJI AGRAS MG-1).
- ❖ Xarvio (BASF) (www.global.xarvio.com)
 - Xarvio Field Manager
 - Vol de drone (7-10 photos/ha).
 - 4 photos livrées en 48 h :
 - Orthomosaïque, cartes d'infestations, cartes de pression des MH et cartes de prescription.
 - 62 % de réduction en volume d'herbicides appliqués en 2021-2022.
 - Combiné à des images satellitaires pour le suivi de la culture (biomasse).
- ❖ Sentera (<https://sentera.com/smartsript-weeds/>)
 - Ont leurs propres capteurs pour les drones et leur propre algorithme (Smartsript weeds).
 - Modèle d'affaire encore en évolution.
 - Pourrait arriver au Canada dans un futur proche.
 - 2024 :
 - Vitesse de collecte de données : 90 acres/hr
 - 94 % d'efficacité pour ID des MH de 0.25 po
 - Temps pour obtenir la carte de prescription : 10 h (livrée à 6 h a.m. le lendemain du vol).
 - Algorithme capable d'identifier :
 - Graminées et feuilles larges
 - Amarantes
 - Kochia à balais
 - Maïs volontaire

5a. Cartes de prescription pour les MH

Au Canada

- ❖ Geco (<https://geco-ag.com/>)
 - Utilise des images satellites avec des données agronomiques (drone + pulvérisateur, etc.) pour modéliser et cartographier les MH au champ.
 - Détection/prédiction des MH résistantes aux herbicides.



Cette zone a été identifiée comme ayant été une pauvre réponse aux herbicides dans le passé. L'historique agronomique indique l'utilisation des herbicides des groupes 1 et 10. Possible résistance aux herbicides de ces deux groupes. Un suivi agronomique est recommandé.

Crédit images: GECO.

GECO Strategic Weed Management

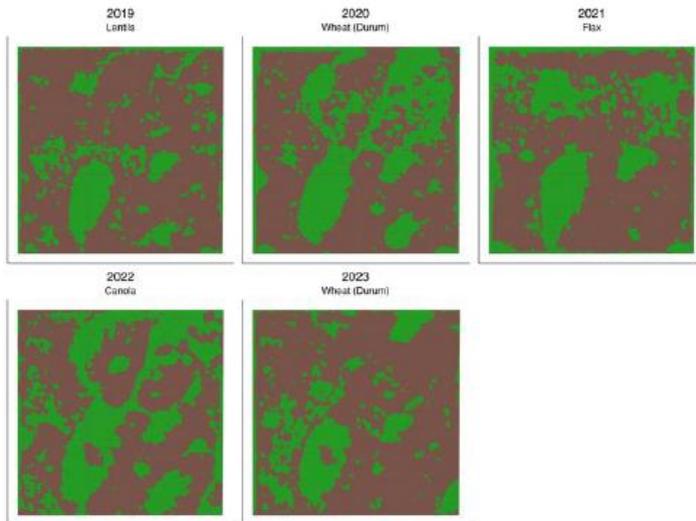
Technologies de pulvérisation intelligente

5a. Cartes de prescription pour les MH

Au Canada

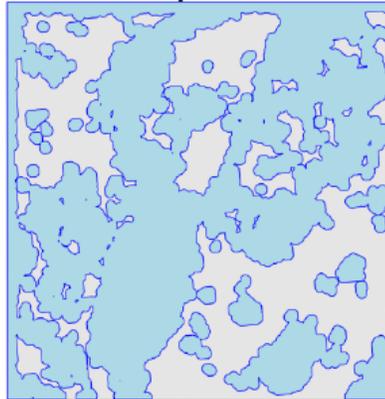
- ❖ Geco (<https://geco-ag.com/>)
 - Identifier et prédire les patrons de distribution au champ

Historique des MH

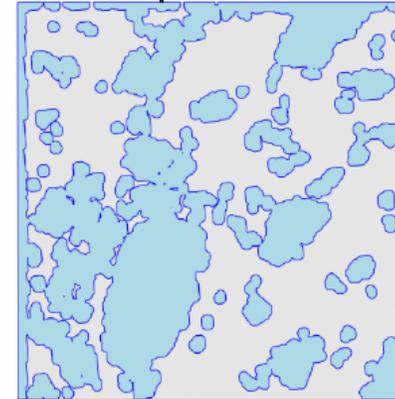


Cible +MH

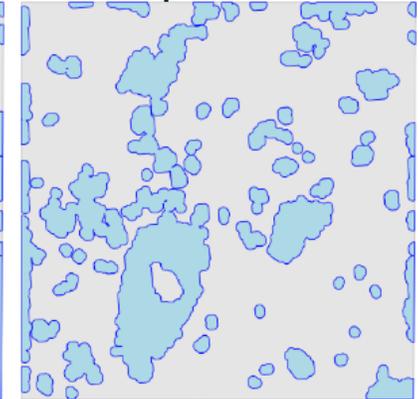
Scénario A
422 acres pulvérisés



Scénario B
306 acres pulvérisés



Scénario C
183 acres pulvérisés



Utilise moins
d'herbicides

GECO Strategic Weed Management

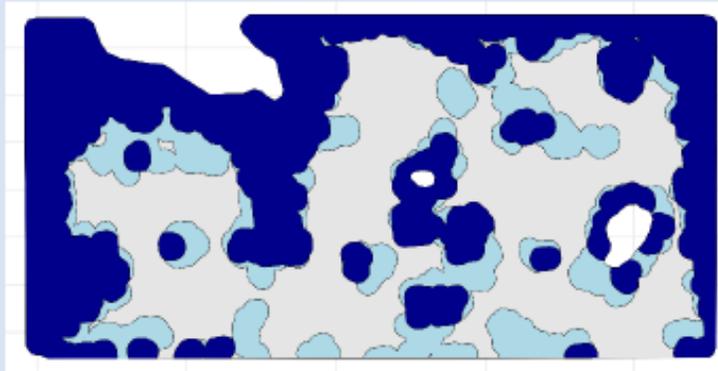
Technologies de pulvérisation intelligente

5a. Cartes de prescription pour les MH

Au Canada

- ❖ Geco (<https://geco-ag.com/>)
 - 24 h pour obtenir la carte de prescription.
 - Différencie les MH de la culture, mais pas en mesure de déterminer l'espèce.
 - Au Canada, les clients l'utilisent surtout pour adapter les stratégies de désherbage pour le kochia à balais, la folle avoine et l'amarante tuberculée.

**Carte de prescription des herbicides :
3 taux : zéro, intermédiaire et maximal**



**Carte de taux de semis variable :
plus élevé dans les zones bleues**



Exemple à Saskatchewan.
Ferme avec des zones
peu productives à cause des
MH.

Le producteur souhaite
utiliser plusieurs approches.

GECO Strategic Weed Management

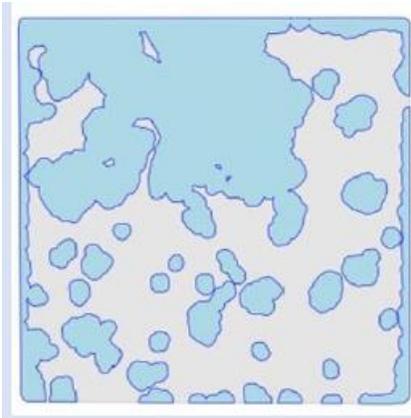
Technologies de pulvérisation intelligente

5a. Cartes de prescription pour les MH

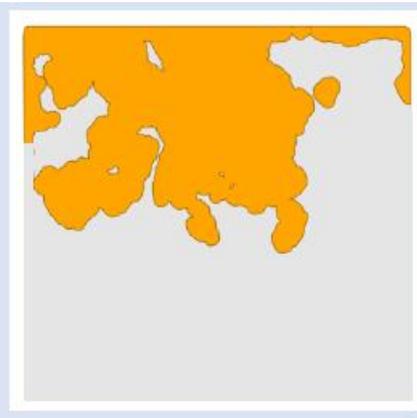
Au Canada

- ❖ Geco (<https://geco-ag.com/>)
 - 24 h pour obtenir la carte de prescription.
 - Différencie les MH de la culture, mais pas en mesure de déterminer l'espèce.
 - Au Canada, les clients l'utilisent surtout pour adapter les stratégies de désherbage pour le kochia à balais, la folle avoine et l'amarante tuberculée.

**Carte de prescription
des herbicides**



**Carte de prescription
pour le travail du sol**



**Exemple à Saskatchewan.
Ferme avec zones
abritant du kochia à balais.**

**Le producteur souhaite
utiliser un nouvel herbicide
+ travail du sol seulement
dans les zones les plus
affectées.**

GECO Strategic Weed Management

Technologies de pulvérisation intelligente

5a. Cartes de prescription pour les MH

Au Québec

Compagnie	Suivi de la santé de cultures	Cartes de prescription	Information de la culture	Épandage par drone	Vente et réparation des drones
XLKEY (https://xlkey.ca/)	Cartes multispectrales	Engrais, pesticides, semis, chaux	Décompte et hauteur	Cultures de couverture, engrais liquides et solides	Vente
Drone Deschamps (https://dronedeschamps.com/)	Oui	Oui	Décompte et autres	Solide, liquide (vrac ou capsule). Épandage des trichogrammes	NA
Les drones Overbeek (https://lesfermesoverbeek.com/drones)	Cartes multispectrales	NA	NA	Cultures de couverture, engrais granulaires et liquides	NA
OJ Ag (https://lesentreprisesoj.com/oj-ag) :	Cartes multispectrales	Oui	NA	Produits liquides et solides	Vente et réparation
DronExperts (https://www.dronexperts.com/)	Oui	NA	NA	NA	Vente, location, réparation et formation
Informex (https://informex.ca/)	Cartes multispectrales	NA	NA	NA	NA

5a. Cartes de prescription pour les MH

Projets de recherche au Québec

- ❖ Essai de pulvérisation d'herbicides suivant une carte de prescription générée à l'aide d'imagerie par drone.
- ❖ Collaboration entre : Ferme EDPA, XLKey et MAPAQ.
- ❖ Été 2024 en Montérégie.
- ❖ Objectif : comparer un traitement herbicide pleine largeur vs une pulvérisation localisée à l'aide d'une carte de prescription.
 - Soya à la volée.
 - MH ciblées : petite herbe à poux et maïs spontané.
- ❖ Herbicides :
 - PRÉ – en pleine largeur : Authority supreme + Sencor.
 - POST – en pleine largeur vs localisé : Contender.
- ❖ Détails de la pulvérisation :
 - Pulvérisateur : Hardi commander 5500 avec 10 sections (100 pi total).
 - Buses à inclusion d'air Hardi ISO Minidrift rouge
 - Système de contrôle des buses : AgLeader.
 - Plateforme pour la lecture de la carte : AgFiniti.
 - Paramètres d'ouverture/fermeture de la rampe : 3 secondes avant et 0,3 sec après.

5a. Cartes de prescription pour les MH

Projets de recherche au Québec

❖ Collecte des données :

- RGB : Drone DJI Matrice 350 RTK, résolution 1,5 cm/pixel.
- RGB et multispectral : DJI Mavic 3M, vols à 43 m d'altitude.
 - RGB : résolution 1,7 cm/pixel
 - Multispectral (NDVI) 2,7 cm/pixel
- Classification par couleur et par hauteur.

❖ Défis et constats :

• **Petite herbe à poux:**

- Résolution à 1,5 cm/pixel ne permet pas de bien reconnaître la végétation.
- Le temps associé à la collecte de données et le traitement des images est trop élevé.
- Le modèle n'est pas adéquat pour le soya semé à la volée et/ou pour du sol avec résidus.

5a. Cartes de prescription pour les MH

Projets de recherche au Québec

- **Maïs spontané :**
 - La résolution à 40 m de hauteur a permis d'obtenir des images avec une résolution de 0.5 cm/pixel.
 - Système d'annotation supervisé pour la création de la carte de prescription.



 : maïs spontané



 : soya



 : sol à nu avec résidus

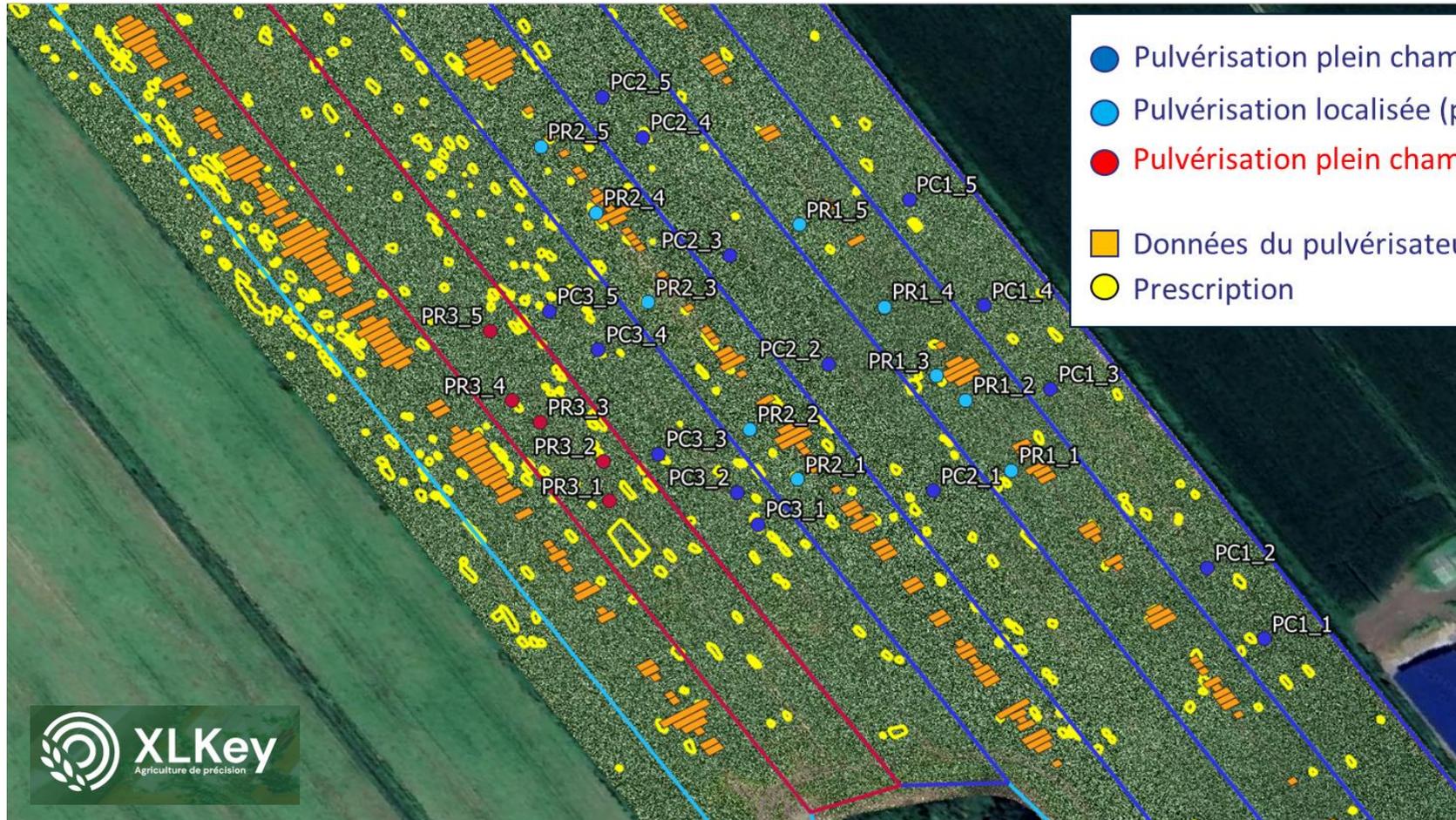
Crédit photo: XLKEY (2024)

Résultats

Le recouvrement du MS dans les quadrats géolocalisés permet de constater que l'algorithme n'a pas ciblé tous les plants de maïs spontané.

Diminution d'herbicides :
80 – 91 % selon la sensibilité de la zone tampon.

Économie moyenne :
27,6 \$/ha



- Pulvérisation plein champ
- Pulvérisation localisée (prescription)
- Pulvérisation plein champ-PC4
- Données du pulvérisateur
- Prescription

Crédit photo: XLKEY (2024)

Projet à venir

- ❖ Nouveau projet en collaboration entre XLKEY, MAPAQ et CÉROM.
- ❖ **Objectif général** : Évaluer l'efficacité et la rentabilité d'un système de gestion des mauvaises herbes (AMBEL et ZEAMX) basé sur des cartes de prescription et l'application localisée d'herbicides dans la culture du soya.
 - Améliorer l'algorithme.
 - Évaluer la précision de la pulvérisation.
 - Quantifier la réduction des herbicides.
 - Évaluer la rentabilité du système comparé à la pulvérisation en pleine largeur.
- ❖ Recrutement de 4 sites en Montérégie pour la saison 2025.



Crédit photo: XLKEY (2024)



Projet en cours : Dépistage de l'amarante tuberculée avec des images satellites

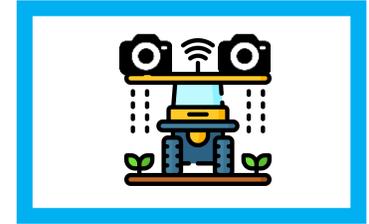
- ❖ Collaboration entre le CÉROM et l'ÉTS en appui au RAP-malherbologie et au RAP-Grandes cultures.
- ❖ Objectif général : développer un algorithme pour identifier l'amarante tuberculée (AMATU) à l'aide d'images satellites dans la culture du soya au Québec.
- ❖ À terme, le projet permettra de faire le suivi des champs et la surveillance du territoire.
- ❖ Nous sommes à la recherche de sites pour la saison 2025 : Avec présence confirmée de l'AMATU qui nous permettent de prendre les coordonnées GPS des foyers d'infestation.



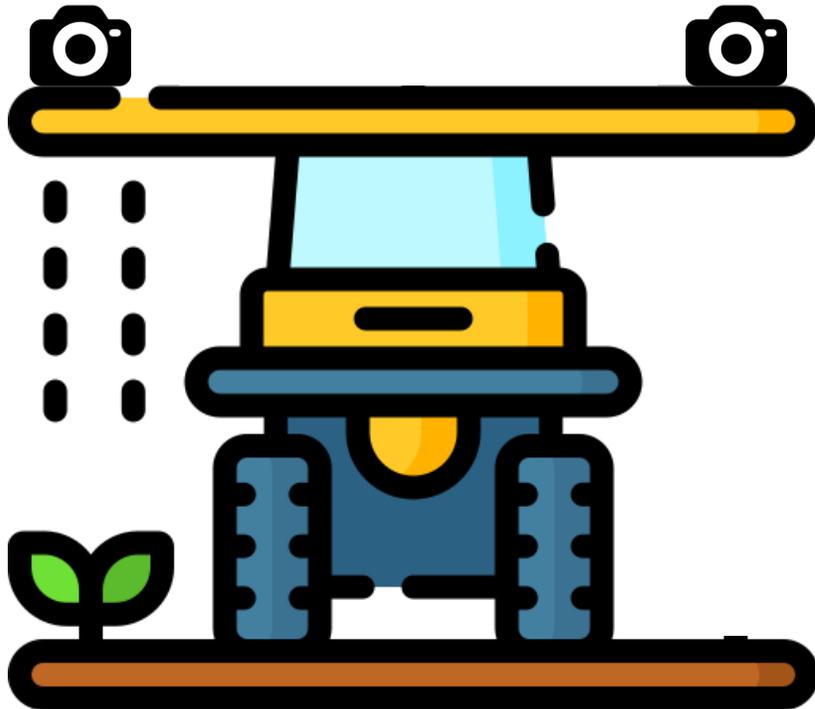
Crédit photo: CÉROM



5B. Pulvérisateurs intelligents



Pulvérisateur intelligent



- ❖ Ce sont des pulvérisateurs qui ont des caméras intégrées et sont capables de différencier les MH de la culture et ouvrir/fermer les buses pour faire la pulvérisation.

5B. Pulvérisateurs intelligents

See & Spray© (John Deere)

- ❖ 36 caméras (RGB et multispectral) sur une rampe de 120 pi.
- ❖ Système de reconnaissance permettant de reconnaître les cultures afin de ne cibler que les MH.
 - Maïs (détection de vert sur vert)
 - Soya (détection de vert sur vert)
 - Champs en jachère (détection de vert sur brun).



Crédit photo: JLD-LAGUË / John Deere

Caractéristiques	See & Spray Select	See & Spray Ultimate	See & Spray Premium
Utilisation en jachères (vert sur brun)	✓	✓	✓
Utilisation en saison (vert sur vert)	NA	✓	✓
Épandage traditionnel par pulvérisation	✓	✓	✓
Nombre de réservoirs	1	2	1
Possibilité d'installer sur pulvérisateur existant	NA	NA	✓
Vitesse maximale (pour la reconnaissance des MH)	NA	12 mi/hr 19 km/hr	15 mi/hr 24 km/hr
Cultures	NA	Maïs et soya	Maïs et soya
Conditions optimales d'utilisation*	NA	Maïs : espacement 30 po et après le stade V2. Soya : espacement de ≥15 po et après le stade V1. Pas compatible avec semis à la volée. Passer avant la fermeture des rangs. Hauteur maximale : moins de 16 po.	
Reconnaissance des MH à l'espèce*	NA	No. Maïs identification de maïs spontané en soya. Pas compatible avec cultures de couverture ou cultures intercalaires.	
Capacité de pulvérisation pendant la nuit	NA	No	

**Vert sur brun seulement.
Brûlage avant semis ou après la récolte.**

**Possibilité d'appliquer deux herbicides différents dans le même passage
Ex. pleine largeur + localisée**

Pré-réquis:

- Modèles depuis 2018 avec la série R400
- Contrôleur de buses ExactApply®
- BoomTrac 2.0®
- Système de récirculation Reclaim®

Modifié de : Lanoie (JLD-Laguë) (2024)

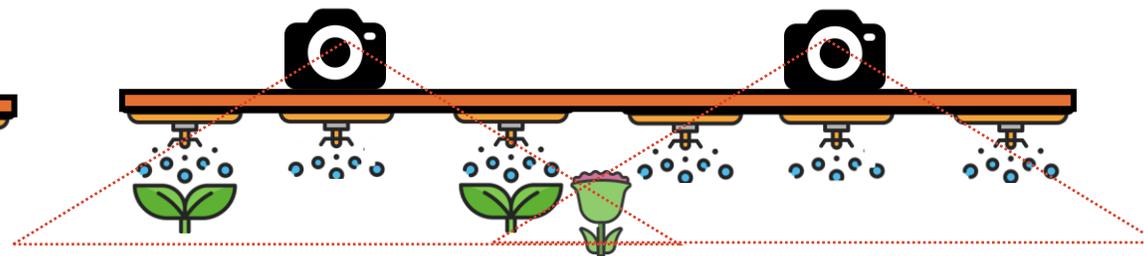
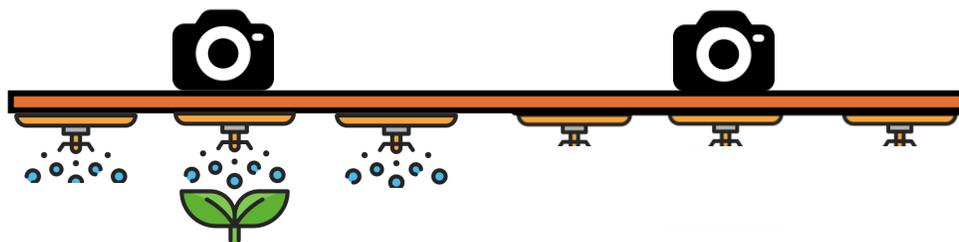


Technologies de pulvérisation intelligente

* Étant donné les améliorations constantes de la technologie See & Spray, ces données peuvent évoluer à tout moment

Ajustement des paramètres de sensibilité

Contrôle par section : 1 caméra = 3 buses



Ajustement de la zone tampon de pulvérisation

- ❖ Ajuster le nombre de buses qui seront ouvertes pour contrôler une même plante.
- ❖ Ce paramètre risque d'influencer fortement la quantité de produit utilisé.



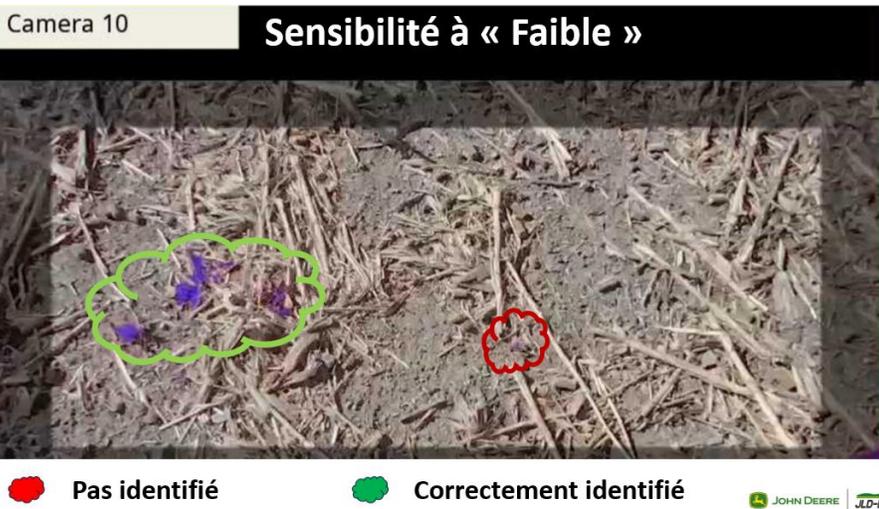
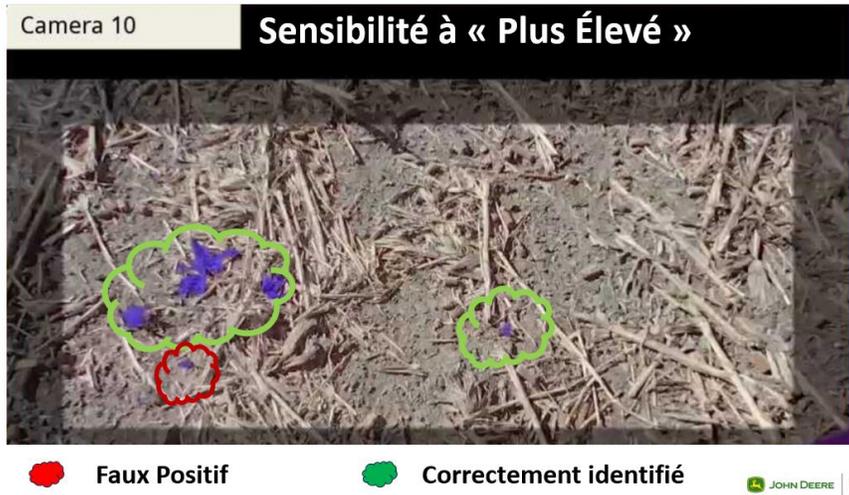
Crédit photo: JLD-LAGUÉ / John Deere

Ajustement de la sensibilité d'identification de MH

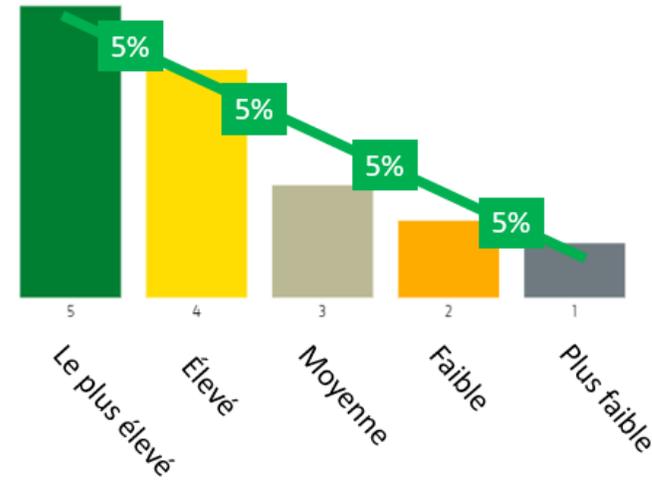
- ❖ Ajustable en fonction des objectifs.
 - Sensibilité élevée :
 - Facilite l'ID des MH plus difficiles à repérer (petites, formes inhabituelles, cachées par des résidus, etc.)
 - Plus de MH = plus d'herbicides utilisés.
 - AMATU : RGB très proche du soya, il faut la sensibilité la plus élevée.
 - Sensibilité moyenne :
 - Équilibre entre couverture et économie
 - Sensibilité faible :
 - Minimise l'utilisation d'herbicides.
 - C'est plus une pulvérisation de précision.

Les espèces de MH devront être considérées au moment de choisir le niveau de sensibilité. Ex. tolérance zéro pour l'amarante tuberculée.

Ajustement des paramètres de sensibilité



Variation de la superficie traitée en fonction de la sensibilité



Tests effectués à Québec en 2024 :

- Réduction moyenne de 40 % comparativement à une application en pleine largeur.

Étude aux É.-U.

- Réduction moyenne d'utilisation de POST entre 28,4 % et 62,4 %

Scénarios d'utilisation

- Brûlage (automne ou printemps).
- PRÉ* en pleine largeur suivi d'un POST localisé, ex. le PRÉ ne contrôle pas une espèce en particulier (ex. souchet), contrôle des MHRH et/ou avec un seul réservoir.
- Pouvoir utiliser des herbicides moins "agressifs" contre la culture maïs qui sont plus dispendieux. Ex. différentes formulations du dicamba ayant ou pas des adjuvants ou *safeners*.
- Utilité d'avoir 2 réservoirs (*dual tank*):
 - PRÉ (antigerminatif)* en pleine largeur + POST contre les vivaces en début de saison (ex. pissenlit)
 - Contrôle des MH avec des herbicides antagonistes. Ex. contrôle du maïs volontaire avec gp 1 (ex. cléthodime) + [dicamba + glyphosate].
 - Application simultanée des produits en pleine largeur (fertilisants, fongicides, herbicides avec activité résiduelle) + application focalisée (herbicide de contact).
- *Attention si les conditions météo ne sont pas favorables au PRÉ (printemps sec ou manque d'eau pour l'activer) il faudrait probablement revenir avec un POST en pleine largeur.

Problématique de souchet dans le maïs	Pleine largeur	Avec See & Spray©
Superficie totale du champ	100 acres	100 acres
Superficie affectée par le souchet	30 acres	30 acres
PRÉ (pleine largeur)	CORVUS	CORVUS
\$/acre	157.86 \$	157.86 \$
Coût application du PRÉ	15 786.55 \$	15 786.55 \$
POST (vs souchet)	PERMIT	PERMIT
\$/acre	92.13 \$	92.13 \$
Coût d'application du POST	9 213.00 \$	2 763.90 \$
\$/acre non- pulvérisé (See & Spray pour le maïs)	NA	6 \$
Coût utilisation du See & Spray (\$/acre)	NA	420 \$
Coût total	24 999.55 \$	18 970.45 \$
Économie faite sur le POST		6 449.10 (70.0 %) \$
Économie sur le total		6 029.10 \$ (24.1 %) \$

Modifié à partir de : Julie Lacasse, Conseillère BAYER (2025)

Scénarios d'utilisation

- Brûlage (automne ou printemps).
- PRÉ* en pleine largeur suivi d'un POST localisé, ex. le PRÉ ne contrôle pas une espèce en particulier (ex. souchet), contrôle des MHRH et/ou avec un seul réservoir.
- Pouvoir utiliser des herbicides moins "agressifs" contre la culture maïs qui sont plus dispendieux. Ex. différentes formulations du dicamba ayant ou pas des adjuvants ou *safeners*.
- Utilité d'avoir 2 réservoirs (*dual tank*):
 - PRÉ (antigerminatif)* en pleine largeur + POST contre les vivaces en début de saison (ex. pissenlit)
 - Contrôle des MH avec des herbicides antagonistes. Ex. contrôle du maïs volontaire avec gp 1 (ex. cléthodime) + [dicamba + glyphosate].

Les valeurs peuvent varier selon le taux d'infestation, les paramètres de sensibilité et la zone tampon (buffer) de l'application choisie

Problématique de souchet dans le maïs	Pleine largeur	Avec See & Spray©
Superficie totale du champ	100 acres	100 acres
Superficie affectée par le souchet	30 acres	30 acres
PRÉ (pleine largeur)	CORVUS	CORVUS
\$/acre	157.86 \$	157.86 \$
Coût application du PRÉ	15 786.55 \$	15 786.55 \$
POST (vs souchet)	PERMIT	PERMIT
\$/acre	92.13 \$	92.13 \$
Coût d'application du POST	9 213.00 \$	2 763.90 \$
\$/acre non- pulvérisé (See & Spray pour le maïs)	NA	6 \$
Coût utilisation du See & Spray (\$/acre)	NA	420 \$
Coût total	24 999.55 \$	18 970.45 \$
Économie faite sur le POST		6 449.10 (70.0 %) \$
Économie sur le total		6 029.10 \$ (24.1 %) \$

Modifié à partir de : Julie Lacasse, Conseillère BAYER (2025)

5B. Pulvérisateurs intelligents

ARA - Écorobotix



Crédit photos: Écorobotix / Univerco

- ❖ Rampe de 6 m de large, avec 3 sections.
 - 6 caméras RGB et 6 caméras de profondeur ; 12 lampes LED; 6 processeurs.
 - 156 buses à 4 cm de distance.
- ❖ Besoin d'un forfait annuel qui inclut l'algorithme de 3 cultures.
- ❖ Génère un rapport de mission.
- ❖ Principalement utilisé en horticulture.

Caractéristiques	ARA
Utilisation en jachères (vert sur brun)	✓
Utilisation en saison (vert sur vert)	✓ Cibler les MH ou cibler la culture (ex. pour application des fongicides)
Niveau de sensibilité d'identification ou de pulvérisation	<ul style="list-style-type: none"> • Option de zone tampon (0-16 cm) autour de la culture • Option de cibler des MH par hauteur (ex. ≥ 15 cm)
Épandage traditionnel par pulvérisation	✓
Nombre de réservoirs	2 : eau claire (500 l) et mélange (200 l)
Vitesse maximale (pour la reconnaissance des MH de ≥ 2 mm)	7,2 km/hr
Cultures disponibles	Maïs-grain, canola, prairies, cultures horticoles (oignons, carottes, laitues, épinards, etc.)
Cultures en développement (version beta)	Soya, blé, maïs sucré, brocoli, chou, chou-fleur, etc.
Reconnaissance des MH à l'espèce*	L'algorithme identifie la culture et pulvérise ce qui n'est pas la culture. Exceptions : les patiences (<i>Rumex</i> sp) et les chardons présentes dans les prairies et les patates volontaires dans les oignons.
Capacité de pulvérisation pendant la nuit	Oui

- Besoin d'un forfait annuel qui inclut l'algorithme de 3 cultures.
- Génère un rapport de mission.
- Au Québec, principalement utilisé en horticulture.



Vidéo du témoignage à Napierville, Québec

A. Grégoire (Univerco, 2025, comm. pers.); Anken et coll. (2023)

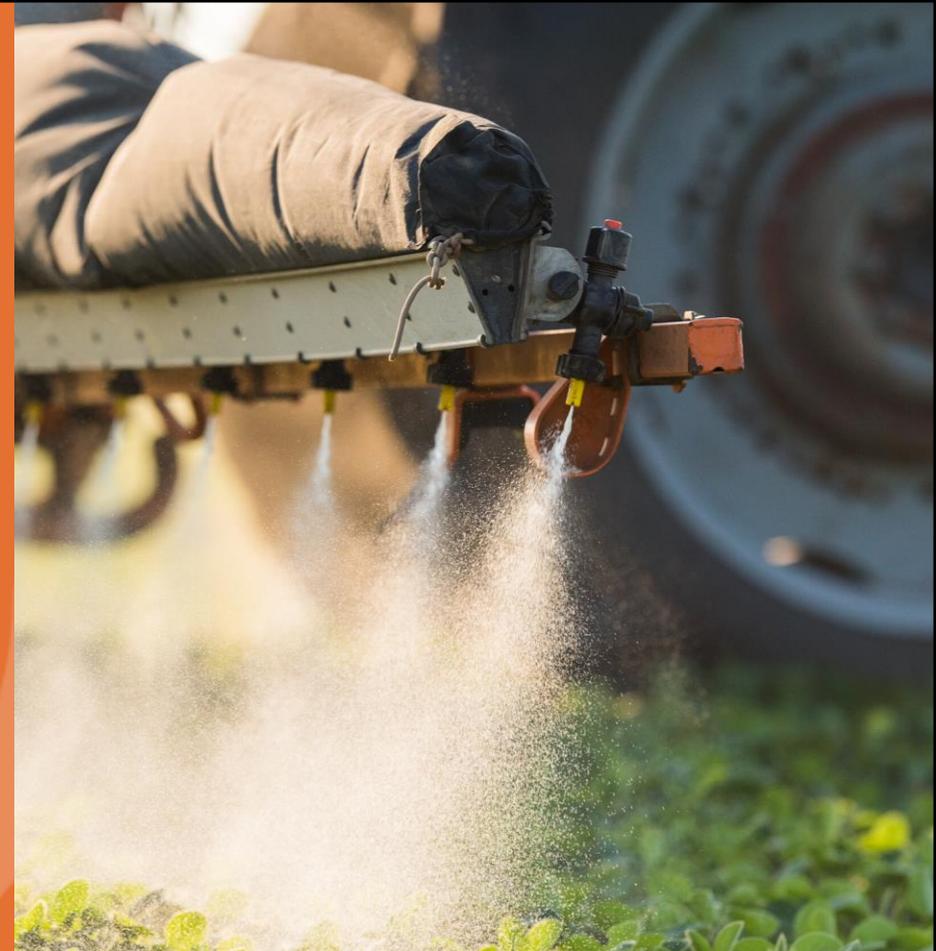
La recherche avec ARA

- ❖ Il est estimé que la dérive est réduite jusqu'à 90 %.
 - Grâce à l'angle des buses et à la présence des rideaux autour de la rampe afin de bloquer la lumière (pour les caméras) et aussi pour réduire la dérive.
- ❖ 2023 : 57 machines ARA ont complété 1 682 missions de désherbage dans les oignons.
 - 78,9 % d'herbicide a été sauvé en moyenne sur 8 266 ha comparé au traitement plein champ.
 - 1/3 des missions ont sauvé jusqu'à 90 %.
 - L'efficacité moyenne vs les MH était de 92 % vs 99 % en plein champ.
 - L'efficacité a varié selon l'espèce (ex. renouée persicaire vs séneçon vulgaire), mais cela n'était pas clair si c'était en fonction de l'efficacité de chaque matière active utilisée.
- ❖ L'ajustement de la zone tampon (*buffer*) aide à minimiser le risque de phytotoxicité des herbicides non sélectifs (ex. acide pélargonique) sur la culture.



Crédit photos: Écorobotix / Univerco

Perspectives et conclusions



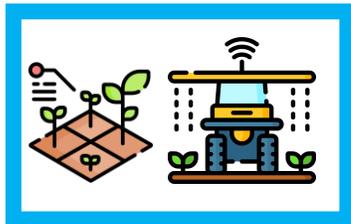
Études encore nécessaires

- ❖ Il est nécessaire de réaliser plus d'essais pour valider les différentes technologies :
 - Comparer différentes technologies entre elles avec différents paramètres de sensibilité pour chacune.
 - Développer et comparer différentes stratégies de désherbage dans différentes cultures et pour le contrôle de différentes MH d'intérêt et avec différents profils de résistance aux herbicides.
 - Réaliser des analyses économiques sous les conditions du Québec.
 - Étudier l'effet de la pulvérisation localisée sur le développement de la résistance aux herbicides.
- ❖ Défis :
 - Quantité élevée de scénarios à tester : différents mélanges d'herbicides et de pratiques culturales, nombre et moment du passage... C'est difficile de séparer l'efficacité des produits de l'efficacité de la technologie.
 - Nécessite d'être réalisé sur de grandes surfaces, doit avoir la collaboration des producteurs.
 - L'interdisciplinarité est nécessaire entre les producteurs, agronomes, ingénieurs, développeurs, géomaticiens pour le développement et l'adoption de ce type de technologie.
 - Beaucoup de travail en silos (différentes disciplines, propriété intellectuelle, etc.). Il faudra organiser des groupes de travail en grandes cultures qui étudient ce sujet.
 - Beaucoup de recherches sont faites aux É.-U., mais pour différentes raisons, il faut qu'on s'approprie cette thématique au Canada/Québec.

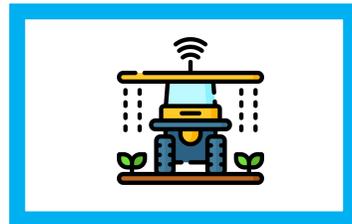
Smedbol, É. et coll. 2024. Projet de recherche :
Développement d'un protocole d'évaluation des technologies de désherbage.

Facteurs à considérer pour l'adoption de ce type de technologie

1. Savoir quels sont les équipements disponibles et/ou nécessaires pour adopter ce type de technologie.
 - a. Compatibilité des équipements avec une application à taux variable / utilisation des cartes de prescription.
 - b. Offre de services disponible (vol de drone, carte de prescription, forfaitaire pour la pulvérisation localisée / taux variable)
 - c. Considérer les frais d'achat, les réparations, le ROI et la désuétude (équipements et algorithmes).
2. Considérer les cultures qui sont incluses dans les algorithmes vs votre rotation de cultures.
 - a. Ce type de technologie pourrait ne pas être compatible avec les cultures de couverture / cultures intercalaires.
3. Connaître les MH problématiques dans votre entreprise.
 - a. Présence et profil de résistance aux herbicides.
 - b. Discuter avec votre conseiller pour développer des stratégies de désherbage adaptées à votre réalité AVANT l'achat de l'équipement.



Cartes de prescription



Pulvérisateur intelligent

Facteurs à considérer pour l'adoption de ce type de technologie

4. Il faut avoir réalisé une auto-évaluation sur la facilité à adopter des nouvelles technologies et/ou développer les compétences d'un membre de l'équipe.
 - a. Compétences en géomatique, agronomie, phytoprotection...
 - b. Cours et certification pour le vol de drone et création des cartes de prescription. Il faut également former les opérateurs des pulvérisateurs ayant ce type de technologie.
 - Quelques formations sur l'agriculture de précision disponibles :
 - à l'ITAQ (GPS et épandage de précision en agriculture (PAD)) et
 - CRAAQ (Formation en technologie d'agriculture de précision).
 - c. Période d'adaptation (courbe d'apprentissage).
 - d. **Pour les clubs conseils** : former du personnel afin de pouvoir conseiller, interpréter les données et/ou offrir ce type de service.
 - e. **Pour les forfaitaires** : opportunité d'offrir des services clé en main (dépistage + pulvérisation).

Attention :

Agriculture de précision = pratiques adaptées à chaque site/situation. Une seule formule NE FONCTIONNE PAS POUR TOUT LE MONDE. Les services doivent être offerts selon le besoin de chaque champ !

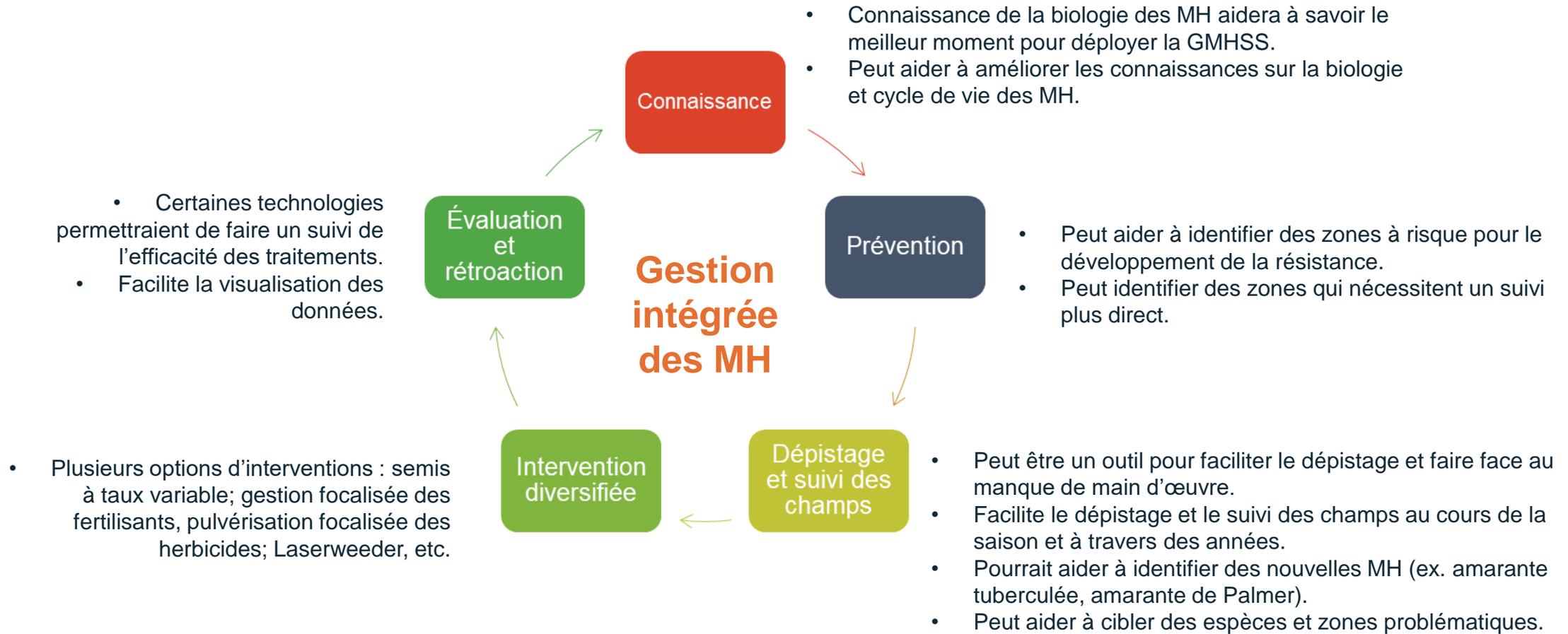
Facteurs à considérer pour l'adoption de ce type de technologie

5. L'investissement pour l'acquisition des équipements peut être un obstacle, notamment pour les petites exploitations.
 - a. Évaluer s'il y a des abonnements annuels, frais d'entretien ou de manutention.
 - b. Coûts des réparations.
 - c. Obsolescence des équipements vs. mises à jour.
 - d. Considérer la location ou les services à forfait.

6. Certains éléments sont toujours valides :
 - a. La calibration des équipements, entretien, biosécurité, etc.
 - b. Une bonne pulvérisation est encore plus importante, pour éviter de développer de la résistance aux herbicides.
 - a. Vitesse d'avancement, hauteur de la rampe, choix des buses, etc.



GMHSS et la gestion intégrée des MH



Conclusions

- ❖ Nous sommes en train de vivre au milieu d'une révolution en agriculture numérique.
- ❖ Il y a de plus en plus de produits et de plateformes qui offrent des solutions pour la GMHSS.
 - Il y a le potentiel de pouvoir intégrer différentes données (régie, phytoprotection, conditions météorologiques) afin de développer une véritable gestion intégrée des cultures spécifique au site.
 - Il y a toujours les défis de partage et d'intégration des données sur les différentes plateformes.
 - Les petites entreprises en démarrage (*startups*) compétitionnent pour le développement des algorithmes et l'offre de services avec de plus grandes compagnies. Cela peut nuire pour une véritable intégration des données ou le développement des produits spécifiques à une problématique régionale.
 - Dans l'ensemble, il y a le potentiel pour avoir une réduction de l'utilisation des herbicides, réduction des coûts d'opération. Le tout va dépendre de chaque site : le taux d'infestation, le profil de résistance, les paramètres de pulvérisation et l'efficacité de l'algorithme. Le prix des herbicides jouera un rôle également, car plus le prix de l'herbicide est élevé, plus l'économie pourrait être grande.

Bibliographie

1. Shaner, D.L. et coll. 2014. The future for weed control and technology. *Pest Management Science*. 70: 1329-1339.
2. Matese, A. et coll. 2024. Are unmanned aerial vehicle-based hyperspectral imaging and machine learning advancing crop science? *Trends Plant Sci*. 29(2): p. 196-209.
3. Coleman, G.R.Y. et coll. 2022. Weed detection to weed recognition: reviewing 50 years of research to identify constraints and opportunities for large-scale cropping systems. *Weed Technology*. 36(6): p. 741-757.
4. Hasan, A.S.M.M. et coll. 2021. A survey of deep learning techniques for weed detection from images. *Computers and Electronics in Agriculture*. 184: p. 106067.
5. López-Granados, F. 2011. Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches. *Weed Research*. 51: p. 1-11.
6. Liu, T. et coll. 2024. Harnessing UAVs and deep learning for accurate grass weed detection in wheat fields: a study on biomass and yield implications. *Plant Methods*. 20(1): p. 144.
7. Nugent, P.W. et coll. 2018. Discrimination of herbicide-resistant kochia with hyperspectral imaging. *J. Appl. Remote Sens*. 12: p. 16037.
8. Lee, M.A. et coll. 2014. Differentiating glyphosate-resistant and glyphosate-sensitive Italian ryegrass using hyperspectral imagery, in Proc. SPIE 9108, Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety VI, 91080B, M.S. Kim et K. Chao, Éditeurs. International Society for Optics and Photonics: Baltimore, MD, USA. p. 91080B.
9. Reddy, K.N. et coll. 2014. Glyphosate-resistant and glyphosate-susceptible Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri* S. Wats.): hyperspectral reflectance properties of plants and potential for classification. *Pest Management Science*. 70: p. 1910-1917.
10. Rakhmatulin, I. et coll. 2021. Deep Neural Networks to Detect Weeds from Crops in Agricultural Environments in Real-Time: A Review. *Remote Sensing*. 13(21).
11. Wu, Z. et coll. 2021. Review of Weed Detection Methods Based on Computer Vision. *Sensors (Basel)*. 21(11).
12. García-Navarrete, O.L. et coll. 2024. Application of Convolutional Neural Networks in Weed Detection and Identification: A Systematic Review. *Agriculture*. 14(4).
13. Avent, T.H. et coll. 2024. Comparing herbicide application methods with See & Spray™ technology in soybean. *Weed Technology*. 38.e74.
14. Anken, T. et coll. 2023. Characteristics of a spot sprayer for the treatment of *Rumex obtusifolius* in meadow. *Landtechnik* 78(3): p. 139-151.
15. van Steenberg, G. et coll. 2024. A technical performance comparison between the Ecorobotix ARA and the shielded bed sprayer.
16. Anne, P. et coll. 2024. The reduction of chemical inputs by ultra-precise smart spot sprayer technology maximizes crop potential by lowering phytotoxicity. *Frontiers in Environmental Economics*. 3.
17. Kutugata, M.. <https://growiwm.org/how-a-national-image-repository-can-transform-agriculture/>
18. Kutugata et GORW IWM – The bench bot: https://www.youtube.com/watch?v=jNV6o_tojEU&t=162s
19. <https://www.precisionsustainableag.org/plantmap3d-1>
20. <https://growiwm.org/what-is-precision-weed-management/>
21. <https://sentera.com/resources/latest-news-and-insights/aerial-weedscout-by-sentera-early-access-program-success-sets-foundation-for-the-future-of-precision-weed-management/>
22. <https://www.pix4d.com/blog/pix4dfields-magic-tool-almond-trees/>
23. <https://www.pix4d.com/blog/drone-mapping-spraying-invasive-species/>

Remerciements

Greg Stewart
Greg.stewart@geco-ag.com
604 809 0430

Ghislain Lanoie
Ghislain.lanoie@jldlague.com
450 524 4441

Alain Gregoire
gregoire.a@videotron.ca

GECO Strategic Weed Management



Victor Morin
info@xlkey.ca
581 994 9172



<https://sentera.com/contact-us/>



Julie Lacasse
Julie.lacase@bayer.com
450 357 6339



Labo d'Élise Smedbol



Labo de Lokman Sboui



Marc-Antoine Larrivée



Stéphanie Mathieu,
RAP-recherche et PIB



L'équipe malherbologie

Technologies de pulvérisation intelligente

Merci !



sandra.flores-mejia@cerom.qc.ca

Questions ?

Sandra Flores-Mejia, Ph.D.
sandra.flores-mejia@cerom.qc.ca

