



CETAB+

Centre d'expertise et de transfert en
agriculture biologique et de proximité

INAB  CÉGEP DE VICTORIAVILLE



Potentiel de la biofumigation contre les pathogènes telluriques en production maraîchère biologique

Colloque "Bio pour tous!" 2026
Emmanuelle Bergeron, biol. agr.,

Plan de la présentation

- Principe et concept de la biofumigation
- Étapes du projet
- Principaux résultats
- Efficacité et effet sur la vie du sol
- Conclusion

Observations

Pratiques culturales:

- Densification des productions maraichères
- Diminution superficie occupée par les CC
- Courte rotation
- ↑zones affectées par les bioagresseurs telluriques

Le projet s'inscrit dans un besoin de trouver des alternatives pour la gestion des pathogènes de sol en production maraichère diversifiée et d'augmenter les superficies en CC annuelles.

Enjeux: Réduire l'inoculum de la maladie dans le sol, tout en préservant ou en enrichissant la santé du sol pour permettre la résilience des cultures aux organismes pathogènes du sol.



Objectifs

Objectifs généraux:

- Documenter la technique de la biofumigation avec la moutarde auprès des producteurs d'ail et de fraises biologiques;
- Sensibiliser les producteurs à l'importance d'inclure les cultures de couvertures dans la rotation pouvant être une stratégie de gestion des maladies de sol et pour la conservation des sols;

Objectifs spécifiques:

- Accompagner les producteurs dans l'implantation et la destruction de la moutarde par le biais d'activités de diffusion;
- Évaluer les populations de pathogènes (*Fusarium oxysporum* et *Verticillium dahliae*) présents dans le sol à différents moments au cours du projet

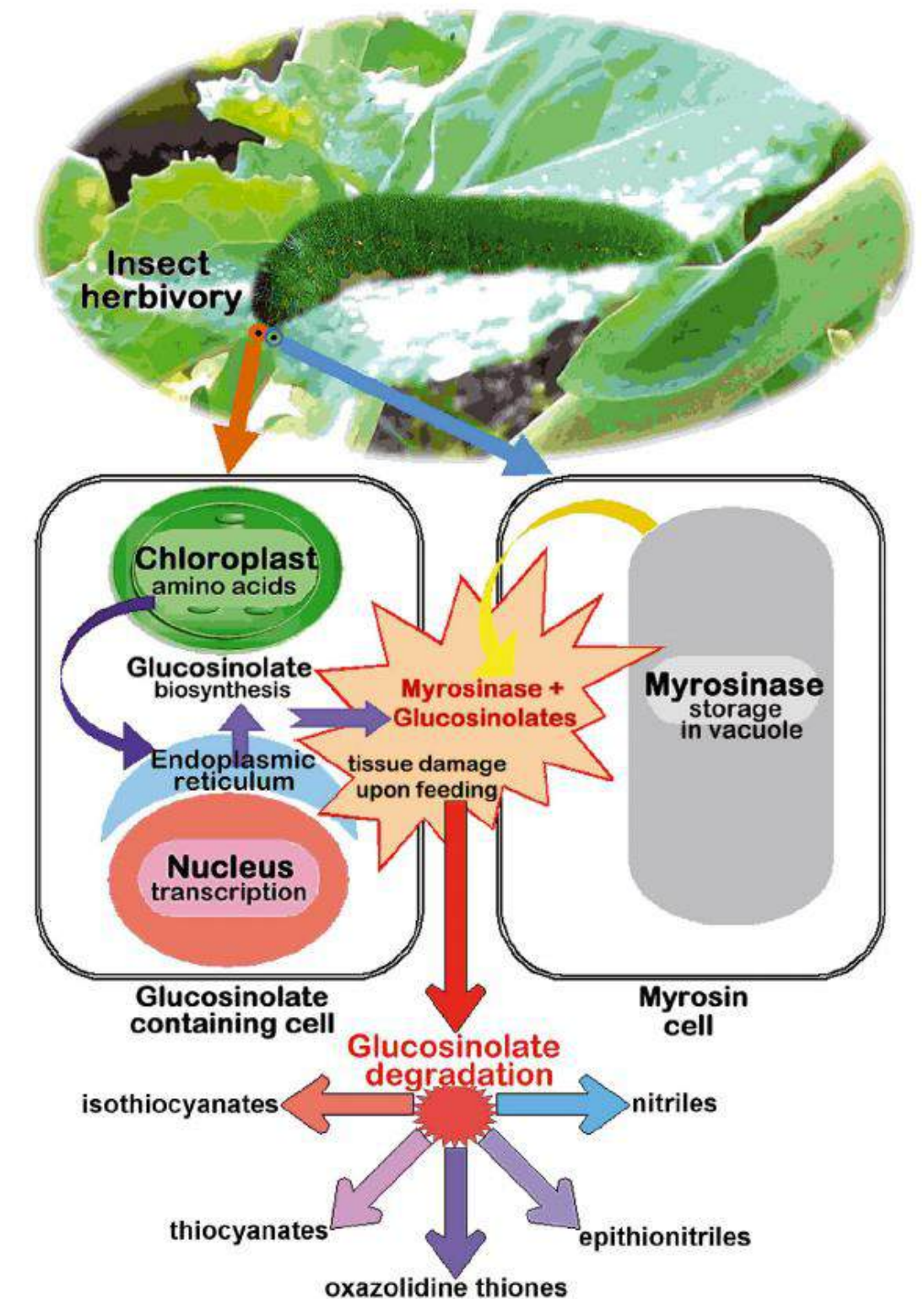
Principe de la biofumigation

Le terme « biofumigation » fait référence à une méthode de contrôle alternative qui utilise des composés biocides naturels tels que les glucosinolate (GLS) produits par une plante pour supprimer les micro-organismes pathogènes du sol.

- Les GSL sont des composés biologiques de défense produits par la famille des crucifères (moutardes brunes, les moutardes blanches, les radis et les roquettes).
- L'hydrolyse des GSL produit des isothiocyanates (ITC) spécifiques qui présentent une activité biologique contre les agents pathogènes telluriques.
- Les ITC ciblent principalement les stades actifs (mycéliums, nématodes mobiles, MH germées) avec effet biocides à large spectre (antimicrobien, antifongique et nématicide) (Brown et Morra, 1997 ; Rosa et al., 1997).
- Le potentiel de biofumigation des brassicacées peut varier considérablement.

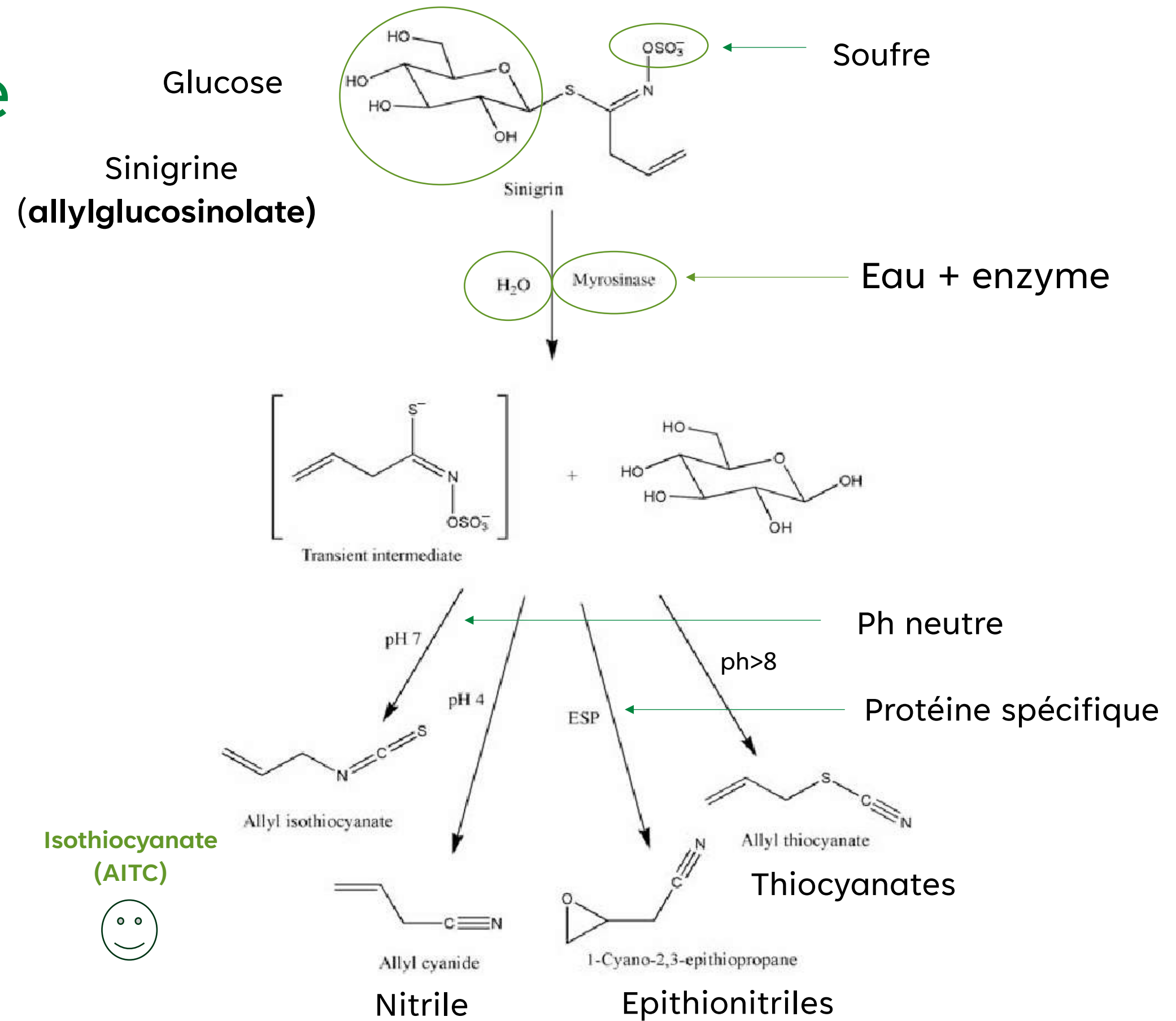
... Au niveau cellulaire

- Les GSL sont stockés dans les vacuoles des cellules végétales et sont biologiquement inactifs.
- La myrosinase est distribuée dans les cellules à myrosine... Souvent peu nombreuses **...

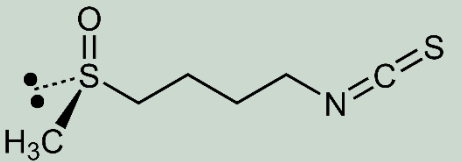
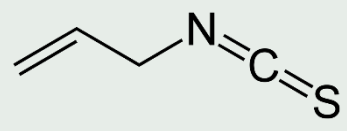
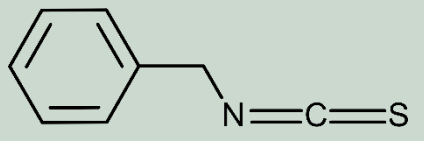
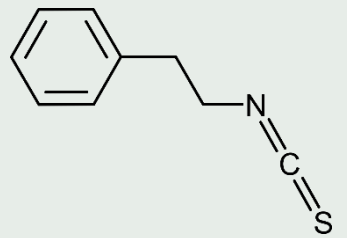
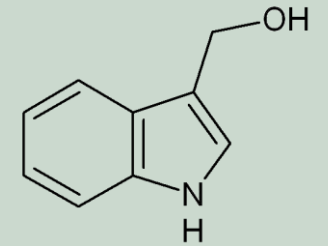


Tirée de: Ahuja et al., 2011

... Au niveau biochimique



Quelques exemples

Groupe	Glucosinolate	Isothiocyanate	Molécule	Principale dominance
Aliphatic GSL	Glucoraphanine	Sulforaphane (SNF)		Brocoli, choux de Bruxelles, choux-fleurs, radis, roquette
	Sinigrine	Isothiocyanate d'allyle (AITC)		Choux, moutarde brune (Brassica Juncea), choux-fleurs
Aromatic GSL	Sinalbin	Isothiocyanate de benzyle (BITC)		Choux, Moutarde blanche (Sinapis alba)
	Gluconasturtine	Isothiocyanate de phénéthyle (PEITC)		Cresson, racine de raifort, choux, choux chinois
Indole	Glucobrassicin	Indole-3-Carbinol (I3C)		Tous les crucifères

Littérature

Culture biofumigante	Organisme	Suppression	Référence	In vitro	Labo	pot	champ	serre
	Fusarium oxysporum	↓ 25 %	Wang et al 2016			X		X
Brassica napiformis	Verticillium dahliae	↓ 64,74 %	Lingbo et al 2022					X
B. oleracea var. botrytis	Globodera rostochiensis	↓ 12% (nouveau kyste)	Aires et al 2009		X			
Brassica juncea (Nemfix, Fumus et ISC199)	Globodera pallida	95 % (inhibition)	Lord et al 2011		X			
Sinapis nigra	Meloidogyne javanica	↓ 90% (taux d'éclosion des œufs) et 100% mortalité larvaire	Salem, M. F., & Mahdy, M. E. (2015)		X			
Brassica Juncea	Meloidogyne incognita	↓ 85 % (nématode vivant)	Li et al 2007			X		
Brassica Juncea	Meloidogyne hapla	↓ 64,67 %	Anita et al. 2011					X
Sinapsis alba	Aphanomyces euteiches	↓ 32 %	Muehlchen et al. 1990				X	
Brassica rapa	Pyrenochaeta lycopersici	↓ 12-52 %	Amenduni et al 2004					
Brassica oleracea	Pyrenochaeta lycopersici	↓ 23-43 %	Amenduni et al 2004					
Brassica Juncea	Rhizoctonia solani	↓ 25%	Van Os et al 2004					
Brassica juncea	Sclerotinia minor	↓ 68%	Daugovish et al 2004					
Sinapsis alba	Sclerotinia minor	↓ 91%	Daugovish et al 2004					
Brassica carinata	Fusarium spp.	↓82%	Campanella et al. (2020)				X	
B. carinata	Phytophthora nicotianae	↓ clamydospores	SERRANO-PÉREZ et al. (2017)	X				
Brassica oleracea et B. juncea	Steptomyces scabies	↓ 90% et ↓ 25%	Gouws and Wehner (2004) Larkin et Griffin (2007)					
Brassica Oleracea	Verticillium dahliae	↓ 35%	Subbarao et Hubbard 1996					
Brassica juncea	Ralstonia solanacearum	↓73%	Bandyopadhyay and Khalko (2016)				X	
Cabbage ND	Pythium aphanidermatum	↓ 48%	Bandyopadhyay and Khalko (2016)				X	
Brassica Juncea	ralstonia solanacearum	62%	Akiew et trevorror 1999					
Brassica juncea	Ralstonia solanacearum	ND	Kirkegaard (2009)					
Brassica juncea	Rhizoctonia solani	↓28%	Motisi et al. (2013)					
Brassica juncea	Rhizoctonia solani	↓24%	Cochran and Rothrock (2015)				X	
Brassica juncea	Rhizoctonia solani	↓39,1	Abdallah et al. (2020)		X			X

Le projet

Organisme	Maladie	Culture	Symptôme
<i>Fusarium oxysporum</i>	Pourriture fusarienne (syn. Flétrissement fusarien)	Ail	Feuille: jaunissement de l'apex bulbe = réduction grosueur – racine: brunissement
<i>Verticillium dahliae</i>	Verticilliose (syn. Flétrissement verticillien)	Fraise	Feuille: jaunissement en forme de V sur les feuilles basale- brunissement du système vasculaire et du collet



Slide 11. Foliar symptoms of Fusarium.



Slide 12. Basal rot of garlic caused by Fusarium.



Source: Omafra, 2023



Suivi en entreprise

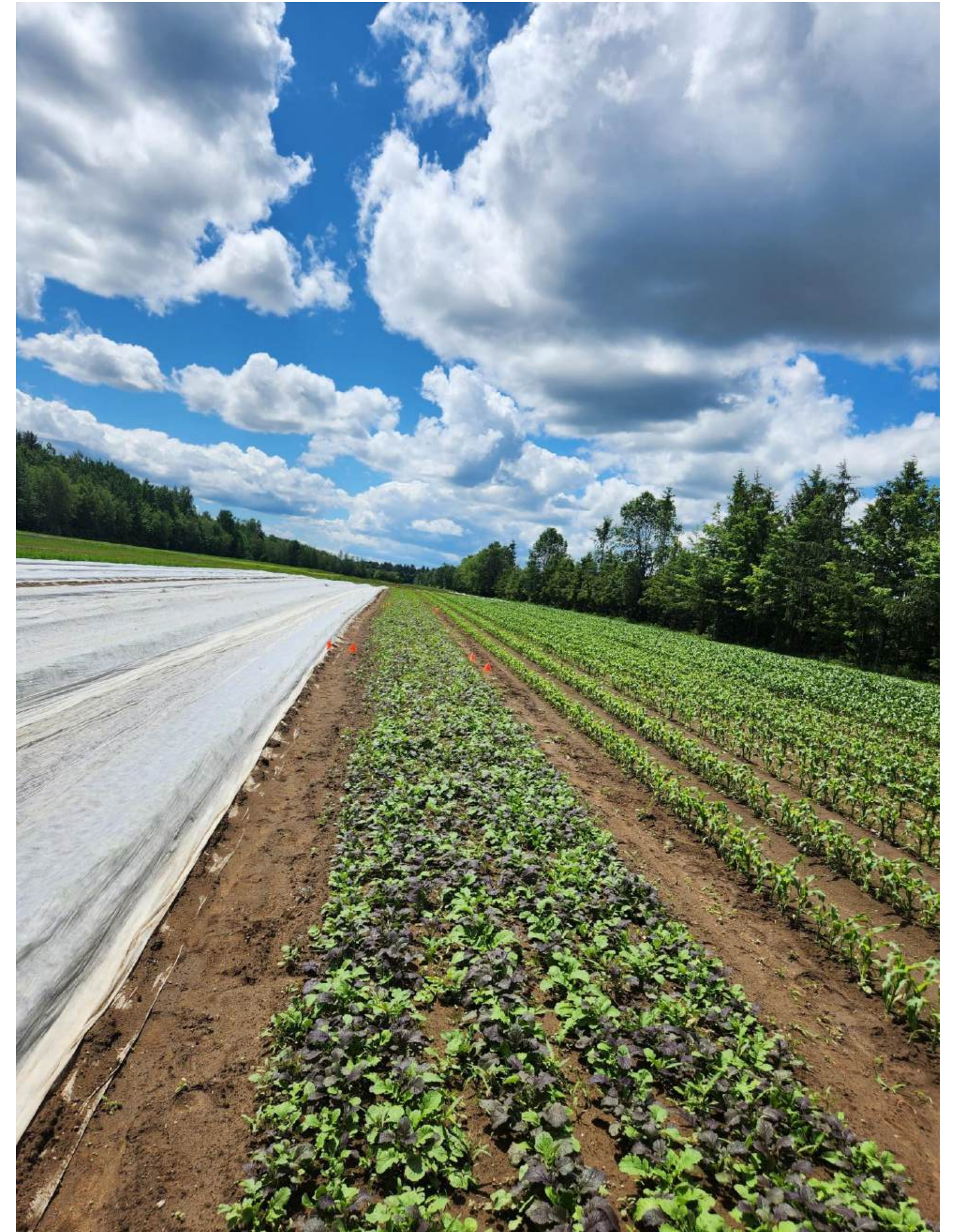
Parcelles aléatoires géoréférencées 2X (5m²)

Suivi de la levée de la moutarde

Prise d'échantillonnage de sol (qPcr- Laboratoire Phytodata)

- Avant le semis
- Journée de la biofumigation + évaluation de la biomasse
- 14 jours après la biofumigation
- 1 mois après la biofumigation
- 2 mois après la biofumigation
- Avant la récolte et après la récolte.

Évaluation récolte (RDM, calibre, déclassement)



Sélection des sites

Les facteurs environnementaux comme la température, le pH, l'humidité du sol et la texture de sol peuvent affecter le rendement de la culture et influencer sur la rétention des ITC dans le sol.

Texture de sol: Mieux limoneux / Moins sol argileux lourd - Éviter les sols mal drainés

(Baysal 2019, Mattheiessen et Shackleton 2005, Brown et Morra 1997).

Matière organique: $[MO] \uparrow = \uparrow$ sorption des ITC dans le sol (Θ phase gazeuse)

(Smelt et Leistra 1974 et Munnecke et Martin 1964)

pH du sol: pH neutre (ITC)

Site 1	Site 2	Site 3	Site 4
Mauricie			Capitale-Nationale
Ail			Fraise
Mécanisé	Mécanisé	Mécanisé	Mécanisé
Loam	Loam sableux	Loam argileux	Loam sableux
Ph 6,2	Ph 6,3	Ph 6,2	Ph 6,4 et 6,9



Sélection du cultivar**

La sélection des plantes biofumigantes dépend de teneur en glucosinolates du cultivar, le type ITS principal libéré et la capacité de la culture à produire biomasse élevée.

- Nemat/Caliente Rojo (25% roquette, 75% moutarde brune)
- Produit 15-20 % plus de glucosinolate que Caliente 199 (communication personnelle Joe Gies).
- Biomasse humide - Objectif: 50 t/ha (15 à 20 % de MS)
- ITC adapté au pathogène** (Glucosinolate=90% sinigrine)



MÉLANGE ROQUETTE-MOUTARDE NEMAT/CALIENTE ROJO :

Ce mélange de roquette et de moutarde est conçu pour renforcer la lutte contre les nématodes et les taupins en agriculture biologique ou dans le cadre de programmes de lutte intégrée conventionnels. Il fournit également une excellente biomasse d'engrais vert, améliorant ainsi la structure du sol et la résistance aux maladies et aux adventices.

Semis

Taux de semis: 12 kg/ha

Travaux:

- Préparation du lit de semence (herse + vibro)
- Rouler après le semis
- Planifier avant une pluie (risque de dormance secondaire)

Littérature (ISCI99):

- Un taux de 12 kg/ha contenait une concentration significativement plus élevée de sinigrine/surface (mmol/m²) (Urwin 2019)
- Pour les moutardes *B. juncea* des taux de semis plus faibles ont entraîné un potentiel de libération d'ITC **aussi élevé** qu'un taux de semis plus élevé.
- Myrosinase?



Date de semis

La moutarde doit être semée environ 45-60 jours avant l'optimum de développement du pathogène dans le sol et l'atteinte du stade 50% floraison (min 550 DJ base 5).

- Fusarium Oxysporum: 16 et 30°C
- Verticillium dahliae: 21 et 27 °C.

JAM: début juin: 42 jours

JAM: début juillet: 55 jours

Date de semis tardive: risque**

Faible Biomasse et production de glucosinolate - photopériode longue et température 15-25°C.***



Fertilisation

La fertilisation de la culture est nécessaire pour permettre la production des glucosinolate et l'atteinte de la biomasse optimale avant l'incorporation.

- Fertilisation en proportion N : S est de 4:1
- 100-140 kg N/ha selon le type de sol et le précédent cultural(25 kg N pour 1000 kg MS).
Projet 127 kg N/ha.
- S : 20 et 40 kg S/ha. Projet 25 kg S/ha
- Attention carence en soufre** (faible biomasse- AA/coenzyme/ glucosinolate)



Floraison moutarde brune

- Destruction de la culture stade 50 % floraison. ~2 semaines après début floraison
 - Concentration de GSL est plus élevée au stade 50 % floraison (Urwin, 2019).
 - Signe de sénescence des feuilles du bas.
 - Limite croissance verticale.
- ****Un manque d'eau en cours de culture peut entrainer une floraison prématurée et une faible biomasse. Prévoir un système d'irrigation.

10%



~10 fleurs ouvertes sur la tige principale (y compris les fleurs avortées et les gousses en développement)

20 %



~14-16 fleurs ouvertes sur la tige principale (y compris les fleurs avortées et les gousses en développement))

30 %



~20 fleurs ouvertes sur la tige principale (y compris les fleurs avortées et les gousses en développement) + début chute des pétales après 30%

50 %



+ de 20 fleurs ouvertes sur la tige principale (y compris les fleurs avortées et les gousses en développement) + développement des gousses

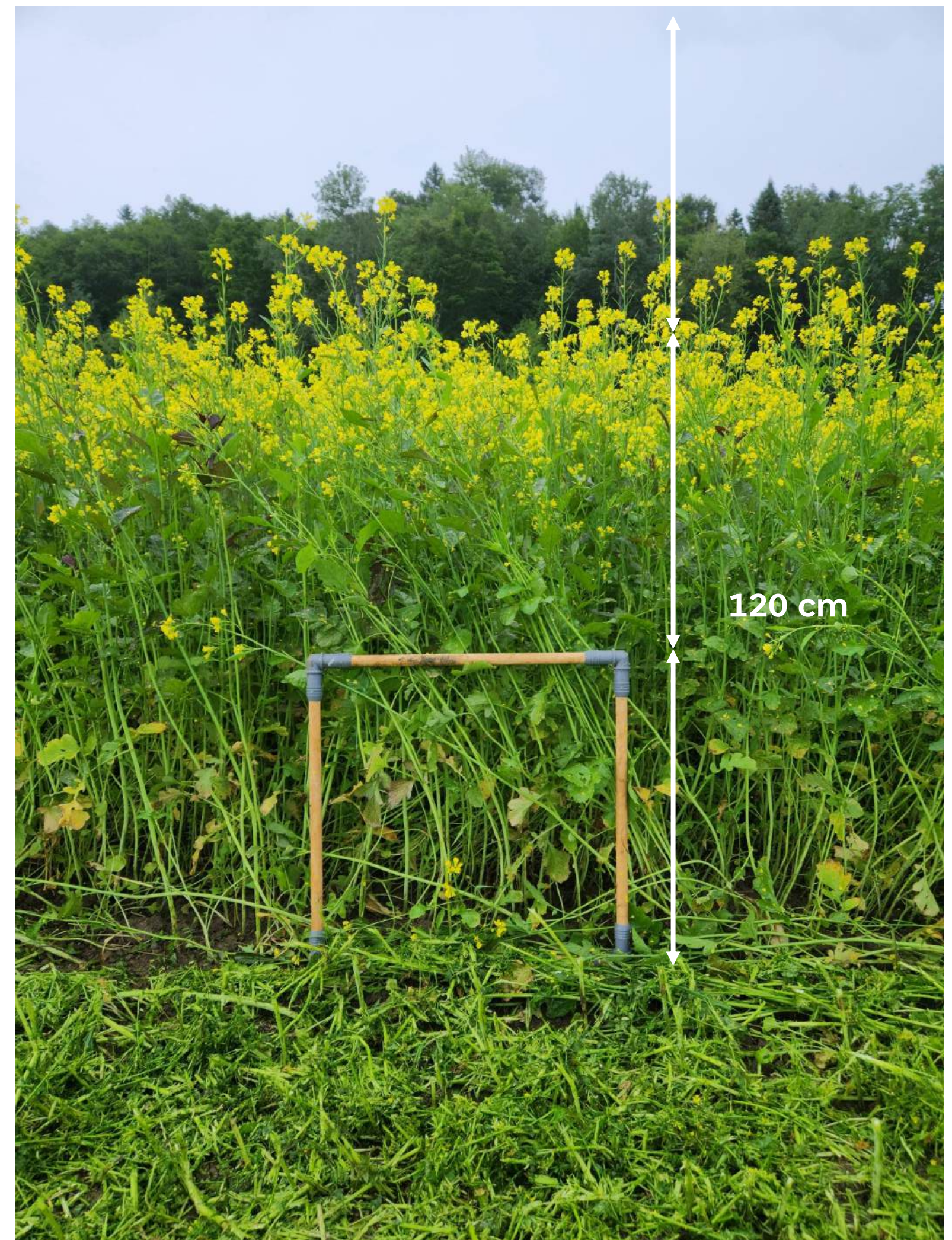


Chute des pétales

Biomasse

- Biomasse humide entre 29 et 47 t/ha** (12%MS)
- Hauteur: 120 à 140 cm selon les sites
- Double biofumigation (échec)

Site	Date de semis	Date d'incorporation	Croissance		Biomasse	
			JM	DJ (base 5)	Humide (t/ha)	Sèche (t/ha)
site 1A	2024-05-01	2024-06-13	43	478	5,9	0,80
site 1A2	2024-07-09	2024-09-04	57	845	ND	ND
site 2A	2024-05-22	2024-07-09	48	672	46,3	6,4
Site 2A2	2024-08-17	2024-10-06	50	578	9,5	0,9
Site 2B	2024-08-17	2024-10-06	50	578	7,7	0,8
site 3	2023-06-05	2023-07-21	46	681	33,5	3,9
site 4A	2023-06-05	2023-07-16	41	578	29,3	3,4
site 4B	2023-06-05	2023-07-13	38	531	44,3	4,9
site 4C	2024-05-25	2024-07-08	44	630	7,4	1,70
site CDQ	2024-07-30	2024-09-24	56	682	47,1	5,9
		Moyenne	46	629	40	5
		Minimum	38	531	29	3
		Maximum	56	682	47	6



Broyage

Pour obtenir une libération optimale des ITC, une macération complète des tissus végétaux est essentielle, suivie d'une incorporation rapide dans le sol.

- Faucheuse à fléau (broyeur) + lame à marteau
- Rotation à grande vitesse, mais faible vitesse d'avancement
- Macération complète "pâte" ** = Max [AITC].

Si possible : Irriguer le sol deux jours avant la biofumigation (30 mm)(Neubauer et al., 2014)

.... Plus long que planifié
... Assez broyé?



Incorporation... rapide**

- Rapide 20 à 30 minutes à 10-15 cm avec herse à disque (idéal Θ labour)
- Travailler avec deux tracteurs l'un derrière l'autre

Littérature:

- Concentration initiale élevée (Morra et Kirkegaard, 2002, Gimsing et Kirkegaard, 2006).
- Allyl ITC- 20 minutes -80 % perdu (Srivastava et Abhijeet Ghatak 2017) soit environ 0 % à 3h (Urwin 2019)
- Autres composés soufrés volatils augmentent avec le temps - toxicité nématodes et/ou ravageurs et agents pathogènes (Urwin 2019).
- Trop tardif ? : $\downarrow T^{\circ}C$ ($10^{\circ}C$) = ralentissement formation des ITC (Michel, 2008)

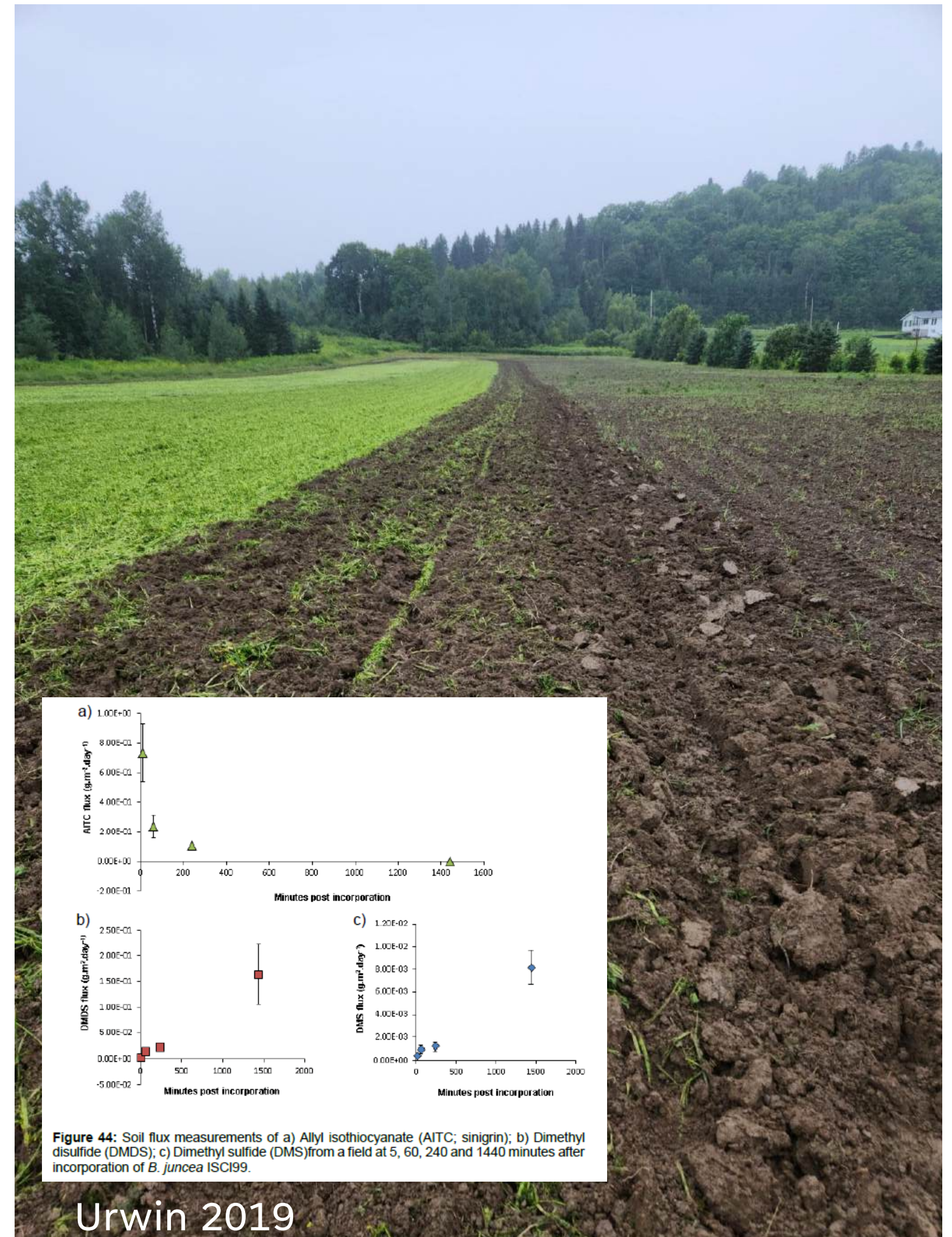


Figure 44: Soil flux measurements of a) Allyl isothiocyanate (AITC; sinigrin); b) Dimethyl disulfide (DMDS); c) Dimethyl sulfide (DMS) from a field at 5, 60, 240 and 1440 minutes after incorporation of *B. juncea* ISCI99.

Urwin 2019

Scellage /irrigation

Le scellage du sol permet de ralentir la libération des ITC dans l'atmosphère (piéger les gaz ITC).

- Compression du sol à l'aide d'un rouleau (idéal 2 passages). Possible recouvrement du sol avec un paillis plastique (Kirkegaard et Matthiessen 2005).
- Précipitations ou arrosage (18-20 mm)**.
Objectif: min 50 % CC. Max 3h suivant destruction.
(Gimsing et Kirkegaard 2006)
- L'irrigation permet de sceller la surface /↓ la volatilisation de l'AITC (↑ concentration d'AITC) et accélérer rcx biofumigation (Matthiessen & Kirkegaard, 2006 ; Kirkegaard, 2009).

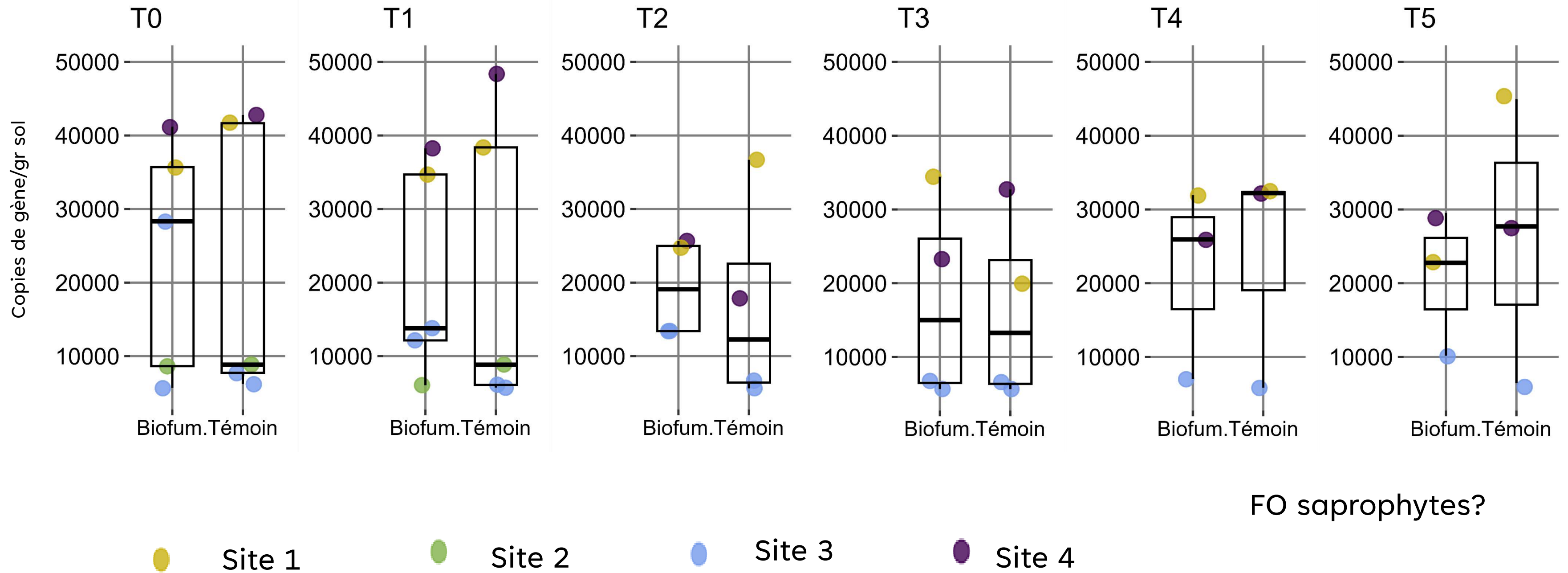


Phytotoxicité

- Laissez au moins deux semaines entre l'incorporation d'un biofumigation et la plantation d'une nouvelle culture.
- Évitez travail excessif du sol avant la culture suivante



Fusarium oxysporum (qPcr)



Rendement ail

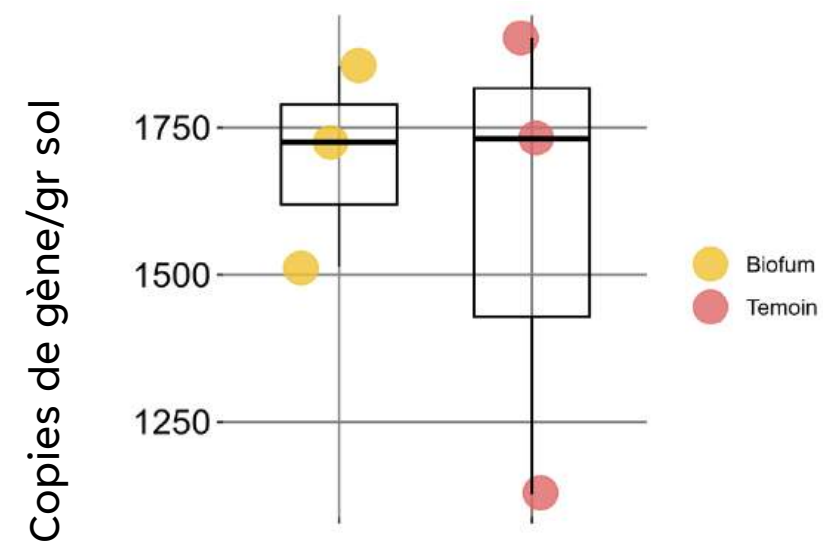
Ferme	Traitement	Rend. total	Rend. commercialisable	Prop. bulbes déclassés total	Prop. poids déclassé total	Prop. bulbes déclassés fusariose	Prop. poids déclassé fusariose
		t/ha	t/ha	%	%	%	%
Site 1	Biofumigation	4.95 ± 0.42	3.41 ± 1.10	35.04 ± 19.05	34.12 ± 18.26	33.10 ± 18.15	32.21 ± 17.96
	Témoin	5.36 ± 0.19	2.40 ± 1.11	56.22 ± 19.96	55.03 ± 20.41	51.82 ± 20.07	51.38 ± 20.50
Site 3	Biofumigation	3.84 ± 0.21	1.63 ± 0.04	54.68 ± 3.99	57.34 ± 2.29	50.97 ± 2.41	55.27 ± 2.86
	Témoin	3.75 ± 0.19	1.43 ± 0.03	56.76 ± 2.06	61.61 ± 1.49	54.80 ± 2.01	60.53 ± 2.56
Site 2	Biofumigation	1.45 ± 0.16	0.78 ± 0.09	46.96 ± 5.83	46.46 ± 2.94	46.96 ± 5.83	46.46 ± 2.94
	Témoin	1.97 ± 0.10	0.66 ± 0.20	67.11 ± 9.93	66.64 ± 10.25	63.68 ± 8.23	65.97 ± 9.92
	F	2.13	1.2	3.19	3.43	2.75	3.12
	p	0.08	0.29	0.07	0.06	0.09	0.08

Calibre des bulbes

Ferme	Traitement	Calibre humide (donnée rend.)	Calibre sec (donnée rend.)
Site 1	Biofumigation	61.52 ± 5.89	42.83 ± 4.02
	Témoin	70.95 ± 3.93	50.21 ± 2.87
Site 3	Biofumigation	72.96 ± 4.95	48.58 ± 3.04
	Témoin	74.74 ± 2.91	49.23 ± 1.93
Site 2	Biofumigation	30.11 ± 2.03	18.98 ± 1.59
	Témoin	36.31 ± 2.25	23.65 ± 1.58
F		3.55	2.47
p		0.08	0.14

Rendement fraise

Traitement	Poids récoltés commercialisable (g)	Poids récoltés déclassés (g)	Proportion de fraises déclassées
Biofumigation	1697.33 ± 99.41	178.33 ± 46.44	10.25 ± 2.23
Témoin	1586.67 ± 235.07	173.00 ± 63.01	10.07 ± 2.80
F	0.19	0.005	0.002
P	0.69	0.95	0.96



Les défis... nombreux

- Rigidité des étapes
- Condition climatique imprévisible (pluie?)
- Délai destruction/incorporation trop court (peu réaliste).
- Disponibilité de la main-d'œuvre élevée
- Disponibilité de la machinerie (ex. : faucheuse à fléau).
- Retard de levée (MH)
- Double biofumigation (faible biomasse)

Limite pour l'adoption de la technique par tous les producteurs.

Impact sur les organismes non ciblés

- **Mycorhize:** Augmente l'abondance relative des champignons mycorhiziens arbusculaires symbiotiques (biofumigation-moutarde) (Walker et al. 2022/2023).
- **Vers de terre:** aucun impact significatif sur la survie ou la croissance des vers de terre (*Brassica Juncea*) (Brown et Morra, 1997, Zuluaga et al., 2015 ; Roarty et al., 2017). Les ITC d'allyle causent un déplacement des populations de vers de terre du sol (Singh et al., 2015 ; Fouché et al., 2016).
- **Trichoderma:** Pas d'effet (sauf caliente 199)- tolérance élevée aux isothiocyanates (Smith et Kirkegaard, 2002 ; Galletti et al., 2008 ; Gimsing et Kirkegaard, 2009).
- **Collembole :** Concentrations élevées de GSL/ITC peuvent avoir un effet néfaste sur les populations de collemboles (*Folsomia candida*) (Jensen et al., 2010).
- **Pollinisateur:** nombreuses espèces utiles se nourrissent de nectar (par exemple, l'abeille, les parasitoïdes et les syrphes).



Limites

- La production des gaz volatils (AITC) de la biofumigation équivaldrait à environ 30% des gaz produits par une stérilisation du sol avec l'isothiocyanate de méthyle (Neubauer et al., 2014). Taux insuffisant pour une réduction des pathogènes (Hu et al., 2015). Les autres molécules issues de la RCX?
- Les plantes contenant des GLS produisant des ITC à faible activité fongitoxique peuvent générer une augmentation des populations pathogènes (Lazzeri et Manici 2001).
- Les cultures biofumigantes peuvent être attaquées par des ravageurs et des maladies telles que la sclérotinia... biofumigation non efficace si cultures sensibles à l'agent pathogène concerné.
- Modification communauté fongique et bactérienne (composition, richesse et diversité) = Perte de stabilité de l'écosystème (Griffiths et al., 2000) = reprise des agents pathogènes (Van Bruggen et Semenov, 2000).
- Peu d'étude sur l'efficacité de chaque isothiocyanate et de leur concentration dans le sol à la suite de la biofumigation et leur effet sur les pathogènes.



Santé du sol

- Amélioration de la structure du sol (infiltration, rétention eau, stabilité des agrégats)
- Disponibilité des nutriments (azote total, P et K assimilables)
- Augmentation du carbone stable
- Augmentation de la matière organique



Conclusion

- Encore en apprentissage de la technique
- Réussite de la biofumigation dépend de nombreux facteurs
- La dynamique des populations de fusariose dans le sol est complexe
- La biofumigation semble avoir permis une diminution des symptômes de fusariose sur les bulbes d'ail, mais aucun effet n'a été observé sur la Verticilliose dans la fraise.

Remerciements

- Producteurs
- Équipe INAB et CETAB+
- MAPAQ pour le financement

Ce projet a été financé par le ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation dans le cadre du programme Prime-Vert.

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec 





Emmanuelle Bergeron, biol., agr.

Conseillère en horticulture maraîchère et serriculture

Tel. : 819-758-6401, poste 2779

Cell. : 819-386-8236

Emmanuelle.bergeron@cetab.org