

Rapport final réalisé dans le cadre du programme Prime-Vert,
sous-volet 11.1 – Appui à la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture

**Développement et implantation d'un système dynamique d'aide
à la gestion intégrée du mildiou de la laitue**

NUMÉRO DU PROJET : PHYD-1-11-1571

Réalisé par :

Hervé Van der Heyden

Mamadou Lamine Fall

DATE : 31 décembre 2013

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent de l'auteur ou des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

Développement et implantation d'un système dynamique d'aide à la gestion intégrée du mildiou de la laitue

Van der Heyden H., Lamine Fall M., Carisse. O.

Durée : 04/2012 – 03/2013

FAITS SAILLANTS

Le Québec est la principale province canadienne productrice de laitue (91 % de la production canadienne), avec une production de plus de 4638 hectares en 2009 (Statistique Canada, 2011). Le mildiou, causé par *Bremialactucaea*, peut être dévastateur lorsque les conditions climatiques favorisent sa propagation. *B. lactucaea* est un Oomycète parasite obligatoire qui se développe dans les zones de cultures de laitues de toutes les régions tempérées et constitue l'une des principales menaces dans les cultures de laitue. L'objectif à long terme de ce projet était de développer un outil d'aide à la gestion intégrée du mildiou de la laitue basé sur la simulation dynamique du cycle de développement de l'agent pathogène. La première étape du développement de ce modèle de simulation dynamique était de caractériser la relation entre l'inoculum aérien de *B. lactucaea* et le développement des symptômes de mildiou. En 2012 et 2013, 6 sites d'essais ont été implantés en conditions contrôlées, et 24 sites d'essais en conditions commerciales. En 2012 et 2013, en conditions contrôlées, nous avons établi qu'il y avait une relation linéaire entre l'incidence du mildiou et la concentration aérienne de spores, tant pour la laitue romaine ($R^2 = 0,87, 0,90$) que pour la laitue pommée ($R^2 = 0,88$ et $0,92$). Il a également été établi au champ qu'une concentration aérienne de 6 à 10 spores/m³ d'air serait suffisante pour causer une incidence de 5 %. En conditions commerciales, une corrélation significative a été établie entre le développement de symptômes et la concentration aérienne de spores 4-5 jours, plus tôt dans la culture de laitue pommée, et 2-3 jours plus tôt dans la laitue romaine. Enfin, dans des semis successifs de laitue, le taux de croissance des courbes cumulatives de spores atteint un maximum plus rapidement pour les 2^e et 3^e semis ou transplants.

OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE OU DÉMARCHE

L'objectif de ce projet était de caractériser la relation entre la concentration aérienne de spores de *Bremialactucaea* et l'apparition des symptômes de mildiou de la laitue. Pour y arriver, trois activités ont été élaborées, soit 1) réaliser une revue de littérature, 2) déterminer la concentration aérienne minimale de sporanges requise pour causer l'infection et 3) de confirmer les résultats en conditions commerciales. La relation entre concentration aérienne de spores et symptômes a d'abord été vérifiée en triplicata en conditions optimales en cabinets de croissance (le dispositif est présenté à l'annexe 4, figures 5 et 6). En 2012 et 2013, six sites d'essais relatifs à l'activité 2 ont été implantés (trois en laitues pommées et trois en laitues romaines). Dans chacun de ces sites, 36 plants indicateurs divisés en quatre blocs de neuf plants ont été disposés aléatoirement dans des parcelles commerciales. Ces plants indicateurs ont été exposés à des concentrations naturelles de spores pour une période de 24 h, puis placés en conditions optimales pour le développement de symptômes. Cette expérience a été répétée trois fois par semaine pour une période de huit semaines. En ce qui concerne l'activité 3, la saison de production a été subdivisée en 3 périodes, correspondant à 3 semis successifs de laitues. Pour chacune de ces périodes, 1 site de laitues pommées et 1 site de laitues romaines ont été implantés sur chacune des 4 fermes participantes, pour un total de 24 sites par année (12 pommées et 12 romaines). Dans chacun des sites, l'évaluation des symptômes et le suivi de la concentration aérienne de spores ont été réalisés 3 fois par semaine. Les données météo ont été prélevées à l'aide de stations automatisées Watchdog 2700 (température, humidité relative, pluviométrie, vitesse et direction du vent, mouillure du feuillage) (Les résultats d'analyses bioclimatiques sont présentés à l'annexe 3).

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS POUR L'INDUSTRIE OU POUR LA DISCIPLINE

Activité 1 (revue de littérature). Le Québec cultive plus de 4 600 ha de laitues, soit 91% de la production canadienne (Statistiques Canada, 2011). Cependant, les conditions climatiques qui prédominent au Québec favorisent le développement du mildiou de la laitue, causé par *Bremialactuae*. À l'est du Canada, le mildiou de la laitue peut être particulièrement dévastateur lorsque les conditions climatiques favorisent sa propagation (Carisse et Philion, 2002). *B. lactucae* est un Oomycète parasite obligatoire, qui se développe dans les zones de cultures de laitues de toutes les régions tempérées (Crute and Dixon 1981; Wicks et al. 1993). C'est l'une des plus importantes maladies dans la culture de laitues à travers le monde (Kushalappa, 2001; Lamour et Kamoun, 2009). La stratégie mondiale de contrôle repose sur l'utilisation de fongicides et de variétés de laitues résistantes. Cependant, les produits chimiques sont devenus peu efficaces pour contrôler le mildiou. La résistance des plants de laitue cultivés, conférée par les gènes Dm, leur fournit une résistance pendant une certaine période avant l'apparition de nouvelles mutations dans le génome de *B. lactucae* (Lepoivre, 2003; Lamour et Kamoun, 2009).

Le mildiou se manifeste surtout dans les zones de production avec des périodes prolongées d'humidité (pluie, irrigation, brouillard, rosée, etc.) et un temps frais. (Lamour et Kamoun, 2009; INRA, 2010). Les sporangiophores émergent à partir des stomates durant la nuit en présence de forte humidité. Le relâchement des spores est sous le contrôle de l'humidité relative et de la luminosité. En effet, le relâchement des spores a lieu avant le lever du jour en synergie avec la diminution de l'humidité relative et l'augmentation de la température (Su et al, 1999; Carisse et Philion, 2002). Les spores sont relâchées et sont immédiatement entraînées par le vent et les courants d'air. Ainsi, l'infection des plantes voisines ou éloignées s'effectue dans les 3 h de mouillure matinale des feuilles (Su *et al.*, 1999; Blancard, 2011). Une température comprise entre 10° et 15°C favorise la germination des spores et le cycle de l'agent pathogène reprend par une nouvelle sporulation (annexe 1). La survie des spores est fonction de la température et de l'intensité de la radiation solaire. Avec des conditions environnementales favorables, *B. lactucae* peut compléter son cycle en 5 jours (Blancard, 2011).

Les jeunes plants de laitue sont particulièrement sensibles au mildiou, et l'infection se fait en 2-3 h en présence de gouttelettes d'eau sur les feuilles. Les symptômes sont de larges taches de couleur vert pâle à jaune, délimitées par les nervures (Blancard, 2011). Ces taches finissent par nécroser et tirent vers une coloration brun clair. La sporulation de *Bremia* débute sur la face inférieure des feuilles, avant ou après que les taches chlorotiques soient visibles sur le limbe. Un feutrage blanc plus ou moins dense apparaît sur ces feuilles. Par la suite, les feuilles fortement touchées nécrosent et meurent (Blancard, 2011).

Activité 2a (en cabinets de croissance). Les résultats obtenus lors des expériences réalisées en 2013 en cabinets de croissance ont révélé la présence d'une relation significative de type exponentiel entre la concentration aérienne de spore (CAS) et l'incidence des symptômes de mildiou pour la pommée ($R_{rep1}^2 = 0.85, R_{rep2}^2 = 0.88, R_{rep3}^2 = 0.77$) et romaine ($R_{rep1}^2 = 0.75, R_{rep2}^2 = 0.91, R_{rep3}^2 = 0.87$), alors que la relation entre la CAS et le nombre de lésions par plant est linéaire et significative, autant pour la laitue pommée ($R_{rep1}^2 = 0.77, R_{rep2}^2 = 0.76, R_{rep3}^2 = 0.70$) que la romaine ($R_{rep1}^2 = 0.79, R_{rep2}^2 = 0.85, R_{rep3}^2 = 0.75$) (Figure 1).

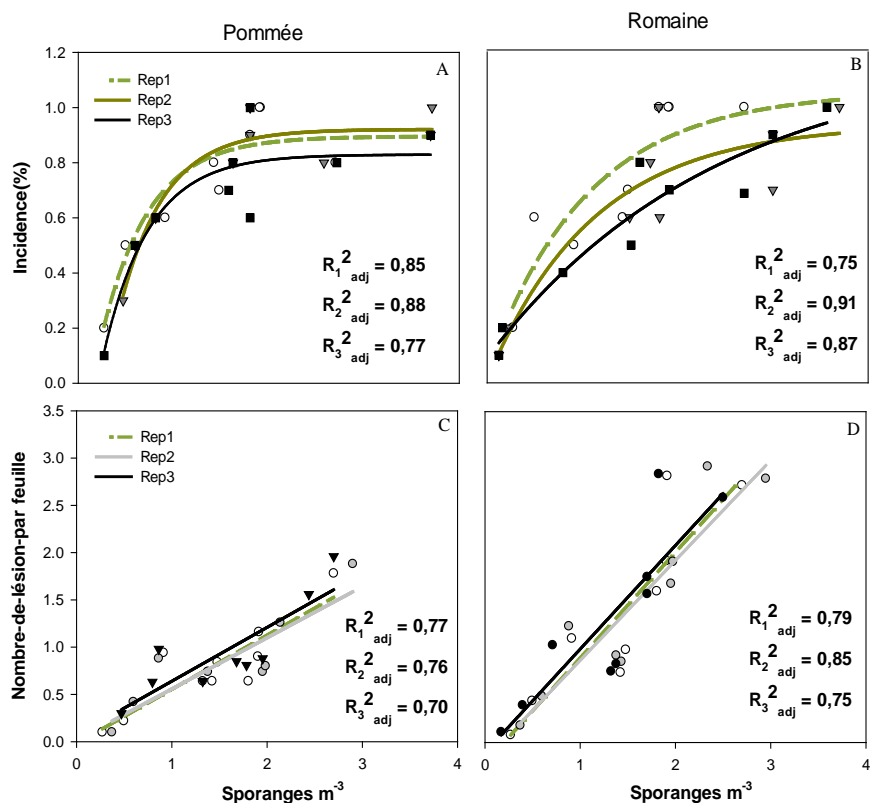


Figure 1 : Analyses de corrélation entre les concentrations aériennes de sporanges de *B. lactucae* et les symptômes de mildiou dans la culture de laitues pommées (A - C) et romaines (B-D) en conditions optimales (cabinets de croissance).

Activité 2b (plants indicateurs). L'analyse des données colligées en 2012 et 2013 a permis de valider la présence d'une relation linéaire entre la concentration aérienne de spores de *B. lactucae* et l'incidence des symptômes de mildiou de la laitue 5 jours plus tard. Les coefficients de corrélation (R^2) associés à la régression linéaire étaient 0,88 et 0,92 pour la laitue pommée, et 0,87 et 0,90 pour la laitue romaine en 2012 et 2013, respectivement. Cette relation est linéaire pour les deux types de laitues utilisées dans cet essai. La saison 2012 semble avoir été beaucoup plus favorable au développement des symptômes de mildiou que la saison 2013 dans les deux variétés de laitues à l'étude. En effet, en 2012, une CAS de 100 spores/m³ d'air aurait causé une incidence de plus de 90 % dans la laitue pommée, tandis qu'en 2013, une CAS de 100 spores/m³ d'air aurait causé une incidence de seulement 10 % (figure 2 A-C). Dans la laitue romaine, 100 spores/m³ aurait engendré une incidence de 46 % en 2012, tandis qu'en 2013, cette même concentration aurait engendré une incidence de 17 % (figure 2 B-D).

Activité 3 (en conditions commerciales). Le projet s'est déroulé sur une période s'échelonnant du 3 juin au 4 octobre 2012 et du 29 mai au 17 septembre 2013. En production de laitue pommée, les premières spores de *B. lactucae* ont été détectées dès l'implantation, pour atteindre un maximum de 308 spores/m³ d'air le 14 août en 2012 et 544 spores/m³ d'air le 12 août, en 2013. En production de laitue romaine, les premières spores ont également été observées dès l'installation, et des maximums de 398 spores/m³ d'air et 1002 spores/m³ ont été observés le 5 août et le 16 septembre en 2012, respectivement, et un maximum de

32 spores/m³ d'air le 27 août en 2013. Pour la laitue pommée, les premiers symptômes de mildiou ont été dépistés le 5 juillet 2012 et le 1^{er} juillet 2013. Les maximums observés étaient de 28 lésions par plant le 2 octobre en 2012 et 23 lésions par plant le 14 août, en 2013. Pour la laitue romaine, les premiers symptômes ont été dépistés le 19 juin en 2013, et le 27 juin en 2013, pour atteindre un maximum de 31 lésions par plant le 16 septembre, en 2012 et de 6 lésions par plant, le 12 août 2013 (figure 3).

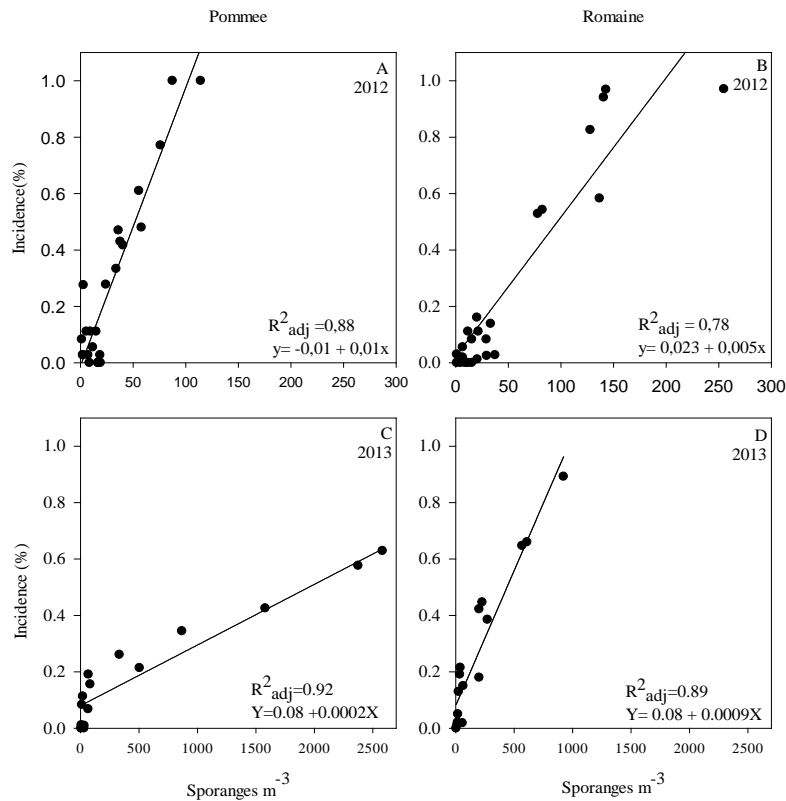


Figure 2 : Analyses de corrélation entre les concentrations aériennes de sporanges de *B. lactucae* et les symptômes de mildiou dans la culture de laitues pommées (A - C) et romaines (B-D) en conditions commerciales non traitées en 2012 et 2013.

La relation entre la concentration aérienne de spores et les symptômes a été établie en conditions commerciales par la méthode développée par Box et Jenkins pour l'analyse des séries temporelles. Ces analyses sont basées sur l'ajustement de modèles autorégressifs à moyenne mobile intégrée (ARIMA) et permettent d'identifier la présence de relation périodique entre deux séries temporelles. Pour la laitue pommée, les résultats obtenus soutiennent les résultats obtenus à l'activité 2; il existe un lien significatif ($r = 0.691; p < 0.0001$) entre les symptômes de mildiou et la concentration aérienne de spores capturées 4-5 jours plus tôt (figure 4A-C). Pour la laitue romaine, il existe également une relation significative entre les symptômes et la CAS mesurée 2-3 jours plus tôt en 2012 (figure 4B). Cependant, la relation est significative pour le jour même en 2013 ($r = 0.334; p = 0.001$). Bien que ce délai soit légèrement plus court que celui obtenu, ces résultats sont en accord avec ceux obtenus à l'activité 2. Par ailleurs, en conditions commerciales, il est important de noter que lors de semis successifs dans un même champ où groupe de champs, une CAS résiduelle persiste entre 2 semis, ce qui explique en partie l'augmentation des valeurs de l'asymptote a et de la pente des courbes sigmoïdes (tableau 1, annexe 2).

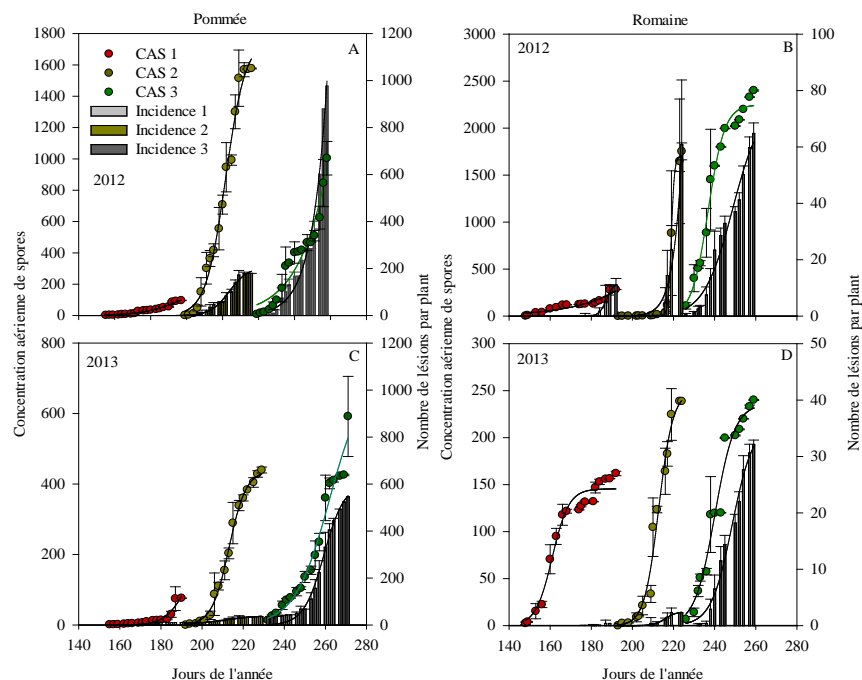


Figure 3 : Analyses de corrélation entre les concentrations aériennes de sporanges (CAS) de *B. lactucae* et les symptômes de mildiou dans la culture de laitues pommées (A - C) et romaines (B-D) en conditions commerciales en 2012 et 2013. Les suffixes 1, 2 et 3 font référence aux périodes ou sites suivis au cours de la saison.

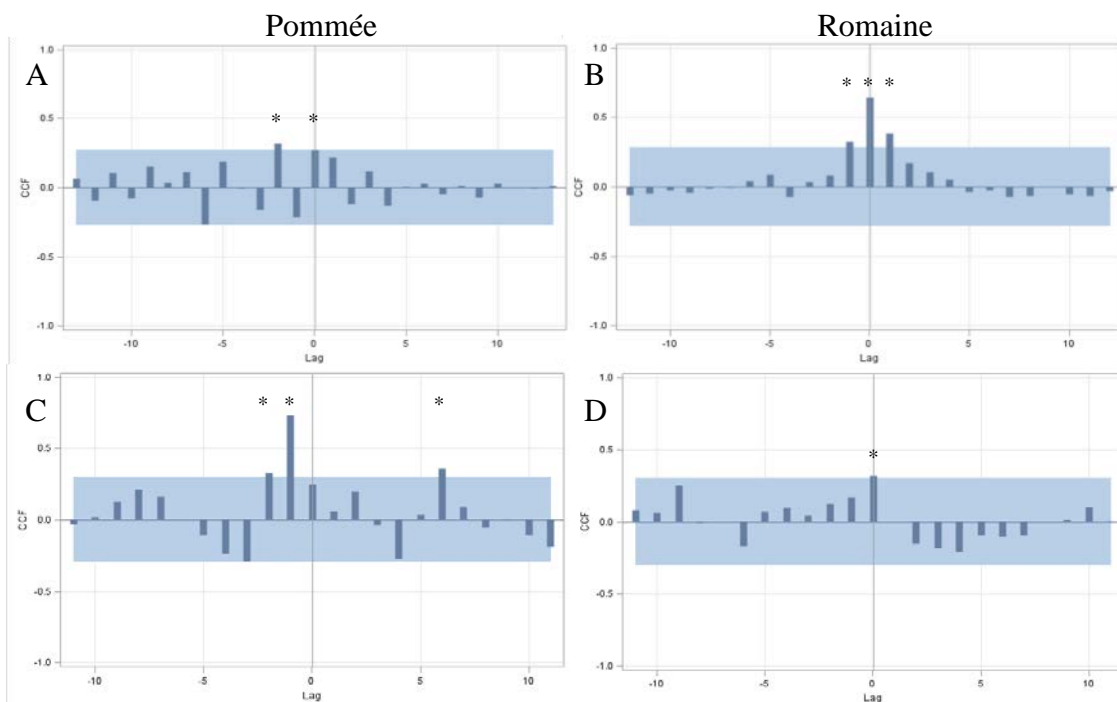


Figure 4 : Analyse de corrélation croisée entre concentration aérienne de spores (CAS) de *Bremia lactucae* et symptômes de mildiou de la laitue. La zone bleu pâle représente l'intervalle de confiance à l'intérieur duquel on accepte l'hypothèse nulle selon laquelle il n'y a pas de corrélation entre les 2 séries temporelles (CAS vs symptômes). Les pas de temps significatif sont identifiés par un astérisque.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE ET/OU SUIVI À DONNER

Ce projet nous a permis d'approfondir nos connaissances sur l'aérobiologie et l'épidémiologie de *Bremia lactucae*, l'agent pathogène responsable du mildiou de la laitue. Ces travaux sont parmi les premiers, au Québec ou ailleurs, à traiter de la relation entre la concentration aérienne de sporanges (CAS) de *B. lactucae*, et le développement des symptômes de mildiou. Le projet s'est déroulé en trois étapes : en conditions optimales (cabinet de croissance), en conditions commerciales (non traité) et en conditions complètement commerciales. Les résultats obtenus lors de ces trois étapes ont permis de démontrer le potentiel d'utilisation des capteurs de spores pour soutenir la prise de décision quant aux moments d'application de fongicides.

De plus, en comparant les résultats obtenus lors des expériences réalisées en conditions optimales et ceux obtenus en plein champ, nous avons pu constater une importante variation de l'efficacité d'infection des spores de *B. lactucae*. En effet, en conditions optimales, une CAS de 3 spores/m³ d'air seulement peut causer une incidence de 80 %, alors qu'en conditions commerciales non traitées, une CAS de plus 100 spores/m³ serait nécessaire pour causer le même niveau d'incidence. Ainsi, nos résultats supportent le besoin de développement d'un modèle de simulation dynamique qui intégrerait différents paramètres bioclimatiques, entre autres, température, humidité relative, mouillure, radiation solaire, cultivar et surtout la relation concentration aérienne de spores et le développement de symptômes). En effet, dans les systèmes de production spécialisés et intensifs, comme la production de laitues au Québec, les fongicides demeurent nécessaires. Cependant, l'efficacité de ces fongicides diminue graduellement à partir de l'apparition des symptômes sur les feuilles. Par ailleurs, la rationalisation de l'usage des fongicides passe par la capacité à prédire l'apparition des symptômes et d'appliquer les fongicides dans les moments opportuns. L'adoption à grande échelle de systèmes de gestion intégrée des maladies passe donc par le développement d'outils d'aide à la décision plus complets et plus performants en termes de prédiction des symptômes.

Le suivi des concentrations aériennes de spores demeure un outil important pour le suivi de pointe des maladies en production horticole et peut être utilisé seul ou combiné à des outils de modélisation. Ainsi, les objectifs qui avaient été fixés au début du projet ont tous été atteints et les données recueillies constituent une base solide permettant le développement d'un modèle prévisionnel de risque de développement des symptômes de mildiou de la laitue. Ainsi, dans l'optique de valoriser davantage les résultats de cette étude, la suite serait de développer un modèle de prévision spécifique au système de production québécois.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Nom du responsable du projet : Hervé Van der Heyden

Téléphone : 514-617-4986

Courriel : hvanderheyden@phyto.ca

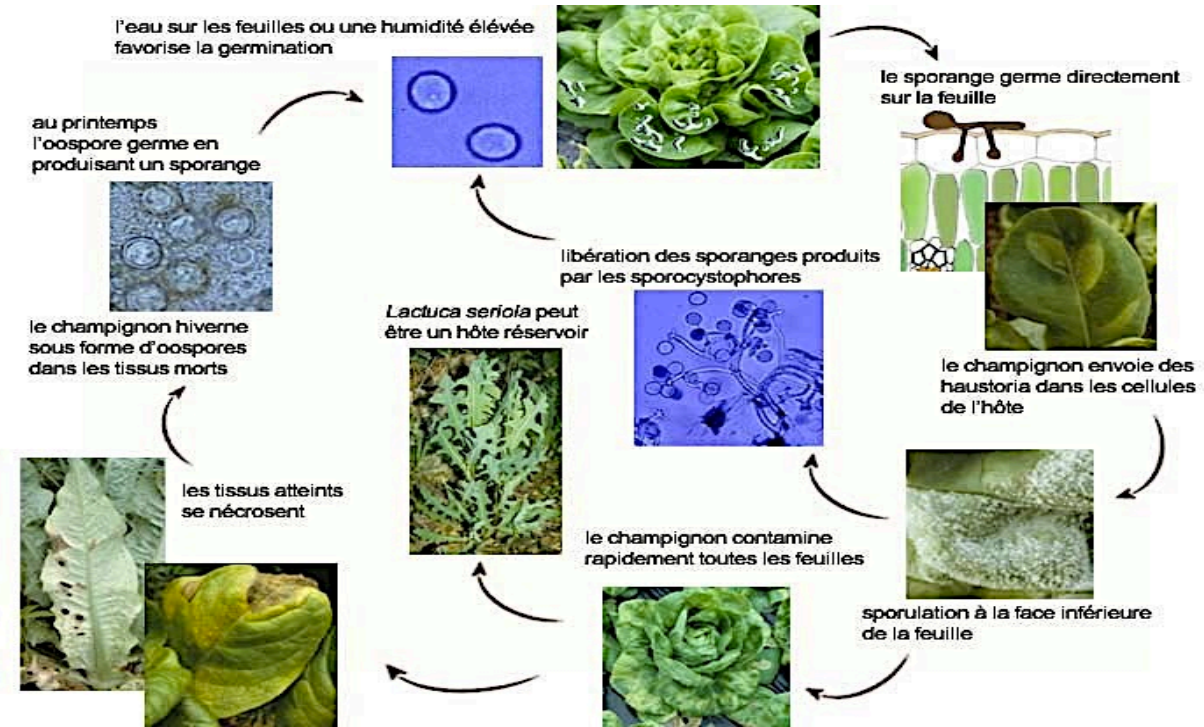
AUTRES TRAVAUX OU RÉFÉRENCES SUR LE MÊME SUJET

- Blancard D. (2011). Biologie, épidémiologie. In Institut national de la recherche agronomique (INRA).
http://ephytia.inra.fr/salade/salade_utilisateur/index_appli.php?portail=legumes&produit=salade&main=2&ssrub1=19&ssrub2=18&ssrub3=35&id_fiche=12&theme=35
- Carisse O., Phillion V. (2002). Meteorological factors affecting periodicity and concentration of airborne spores of *Bremialactucaea*. Canadian Journal of plant pathology, vol. 24, 184-193.
- Crute, I. R., and Dixon, G. R., RUTE, I.R.(1981). Downy mildew diseases caused by the genus *Bremia* Regel. In: The Downy Mildews, pp. 447-450 (ed. by D. M. Spencer). London: AcademicPress.
- Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) (2010). *Bremialactucaea* Regel, Mildiou. In Institut national de la recherche agronomique.
http://ephytia.inra.fr/salade/salade_utilisateur/index_appli.php?portail=legumes&produit=salade&main=2&ssrub1=19&ssrub2=18&ssrub3=35&id_fiche=12
- Kushalappa A., C. (2001). Development of system to forecast risk levels of downy mildew on lettuce (*Bremialactucaea*). International journal of pest management, vol. 47, 1-5.
- Lamour K., Kamoun S. (2009). Oomycete genetics and genomics, diversity, interaction and research tools. Willey-Blackwell. 574 pages.
- Lepoivre P. (2003). Phytopathologie, bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte. De Boeck.
- Su H., van Bruggen A., H., C., Subbarao K., V. (1999). Spore release of *Bremialactucaea* on lettuce is affected by timing of light initiation and decrease in relative humidity. Phytopathology vol. 90, 67-71.
- Statistiques Canada (2011). Production de fruits et de légumes. In statistiques Canada, No 22-003-X, 41 pages.
- Wicks, T. J., Hall, B. and Pezzaniti, P. (1993). Fungicidal control of downy mildew (*Bremialactucaea*) on lettuce. In : Australian journal of experimental agriculture, vol. 33, 381-384.

REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

L'équipe de réalisation du projet tient à remercier le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation pour son soutien financier dans le cadre du programme Prime-Vert, sous-volet 11.1- Appui à la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture (Prime-Vert volet 11.1), sans lequel le projet n'aurait pu se concrétiser. L'équipe de réalisation souhaite également remercier les fermes participantes : Productions horticoles Van Winden, Les fermes Hotte et Van Winden, Delfland Inc. et le Maraîcher JPL Guérin et Fils, l'équipe du centre de recherche et développement en horticultures (CRDH), toute l'équipe du PRISME et de Phytodata Inc., particulièrement à Anne-Marie Fortier pour la relecture ainsi que les étudiants d'été ayant participé au projet.

ANNEXE 1 : Cycle biologique de *Bremia lactucae* (Adaptation de Blancard, 2007)



ANNEXE 2

Tableau 1 : Résultats de l'ajustement du modèle sigmoïde sur les données d'incidence et de concentration aérienne de spores.

Année	Type	Période	Variable	X_0 (SE)	a (SE)	b (SE)	R^2
2012	Pommée	1	ASC	199.04 (9.72)	220.95 (109.61)	11.05 (1.89)	0.97
		2	ASC	221.70 (0.82)	1762.30 (85.76)	5.52 (0.53)	0.98
		3	ASC	308.47 (91.57)	8864.71 (44337.58)	14.44 (4.61)	0.97
		1	Incidence	-	-	-	-
		2	Incidence	223.70 (1.05)	207.49 (14.27)	5.21 (0.64)	0.98
		3	Incidence	332.65 (1862.62)	-	8.49 (1.55)	0.98
	Romaine	1	ASC	192.42 (9.96)	190.17 (219.47)	4.86 (1.92)	0.89
		2	ASC	213.09 (0.33)	438.27 (9.33)	4.16 (0.26)	0.99
		3	ASC	261.98 (3.56)	714.06 (130.19)	8.43 (1.37)	0.97
		1	Incidence	-	-	-	-
		2	Incidence	211.82 (4.25)	45.54 (7.55)	10.29 (2.36)	0.91
		3	Incidence	259.32 (0.79)	603.02 (32.75)	4.95 (0.48)	0.99
2013	Pommée	1	ASC	326.00 (9982.42)	-	21.26 (10.14)	0.87
		2	ASC	218.95 (0.04)	1706.63 (16.09)	0.77 (0.05)	0.99
		3	ASC	236.84 (0.45)	2252.18 (55.38)	4.00 (0.40)	0.98
		1	Incidence	-	-	-	-
		2	Incidence	247.09 (804.12)	14061.14 (.)	4.19 (1.63)	0.96
		3	Incidence	248.73 (3.08)	76.09 (13.18)	6.99 (1.36)	0.96
	Romaine	1	ASC	161.03 (0.71)	145.63 (3.93)	4.03 (0.62)	0.97
		2	ASC	212.79 (0.72)	249.15 (14.74)	3.48 (0.52)	0.98
		3	ASC	240.12 (0.96)	236.44 (12.26)	4.86 (0.78)	0.96
		1	Incidence	-	-	-	-
		2	Incidence	215.97 (0.80)	2.54 (0.22)	2.80 (0.56)	0.96
		3	Incidence	248.55 (1.39)	35.88 (3.40)	5.11 (0.73)	0.98

ANNEXE 3

Les coefficients de corrélation de Spearman ne sont pas statistiquement significatifs pour permettre d'expliquer une potentielle relation entre la concentration aérienne de spores et les paramètres météorologiques (tableau 2). Cependant, il semble exister une corrélation négative forte entre l'incidence du mildiou, la radiation solaire et la température moyenne (tableau 3). Autrement dit, l'augmentation de la température ou de la radiation solaire diminuerait l'incidence du mildiou. En effet, la température moyenne et la radiation solaire affectent la survie des spores (Blancard, 2011). Aussi, l'incidence du mildiou et la durée de mouillure des feuilles sont positivement très corrélées (table 2), une augmentation de la durée de mouillure entrainerait un accroissement de l'incidence du mildiou.

Tableau 2 : Coefficients de corrélation de Spearman entre la concentration aérienne de sporanges et les paramètres météorologiques.

	Pommée		Romaine		Total	
	r_s	P	r_s	P	r_s	P
Température moyenne	-0,259	0,222	-0,259	0,222	-0,195	0,183
Température maximale (°C)	-0,075	0,727	-0,075	0,727	-0,062	0,673
Humidité relative (%)	0,056	0,794	0,056	0,794	-0,110	0,453
Vitesse du vent (m/s)	-0,318	0,129	-0,321	0,126	-0,291	0,045★

Tableau 3 : Coefficients de corrélation de Spearman entre l'incidence du mildiou et les paramètres météorologiques

	Pommée		Romaine		Total	
	r_s	P	r_s	P	r_s	P
Température moyenne	-0,259	0,222	-0,259	0,222	-0,195	0,183
Température maximale (°C)	-0,075	0,727	-0,075	0,727	-0,062	0,673
Humidité relative (%)	0,056	0,794	0,056	0,794	-0,110	0,453
Vitesse du vent (m/s)	-0,318	0,129	-0,321	0,126	-0,291	0,045★

ANNEXE 4

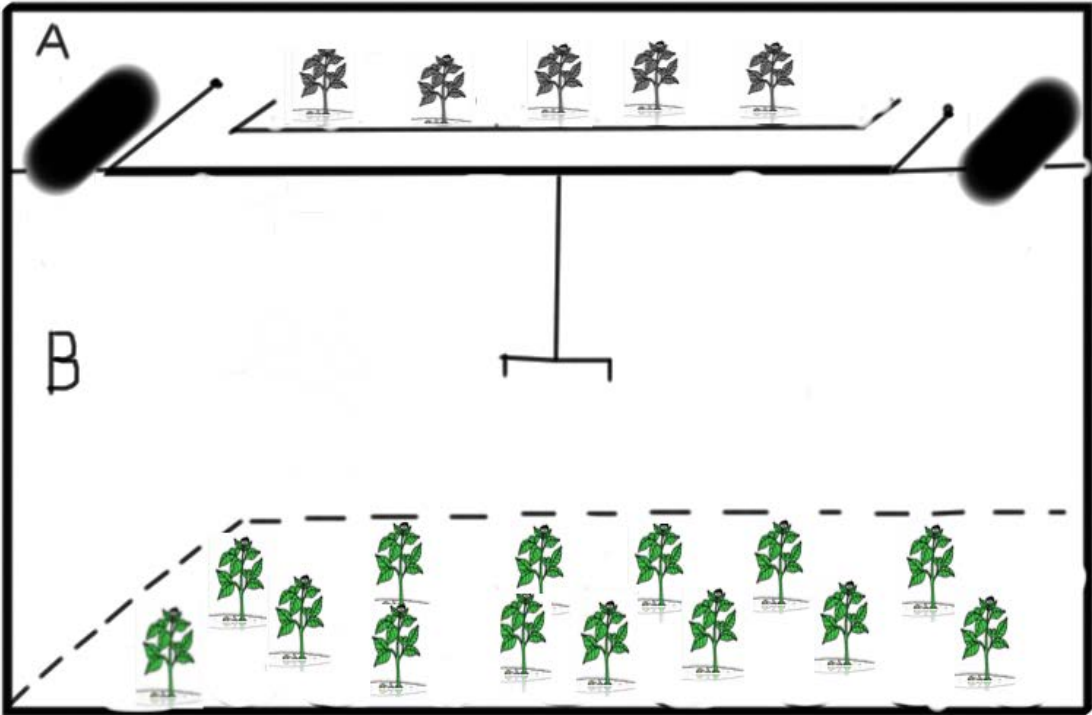


Figure 5 : Schéma du dispositif expérimental en conditions optimales (cabinets de croissance).

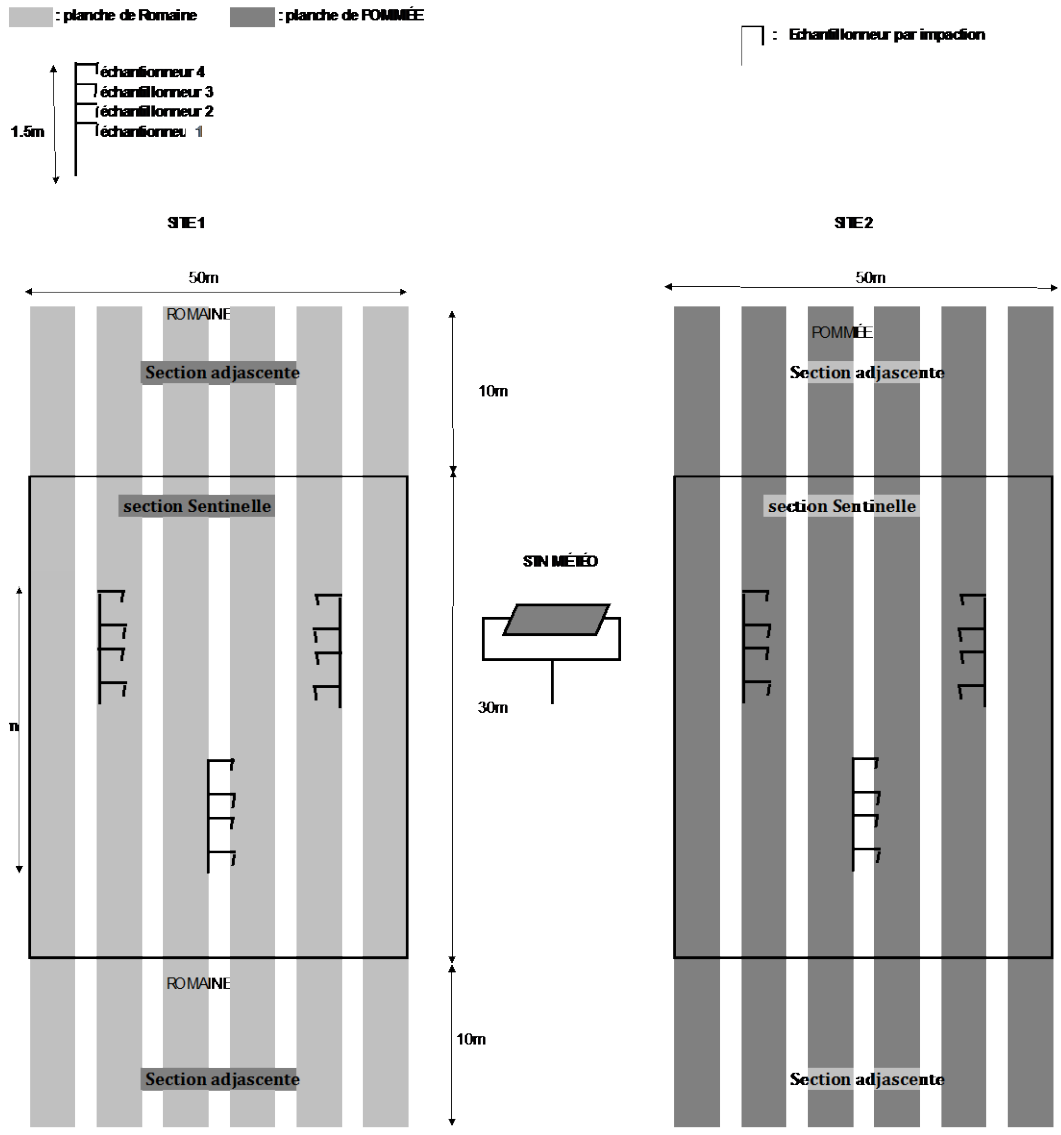


Figure 6 : Dispositif expérimental en conditions commerciales non traitées