

# Programme canadien d'adaptation agricole

5 Rapport final

Développement d'une méthode de détection précoce et préventive des pathogènes à inoculum aérien de la pomme de terre

9 Projet no :

10 6459

4

6

11

13

15

18

21

23

24

25

26

27

28

12 <u>Cie de Recherche Phytodata</u>

14 **Avril 2010- Mars 2014** 

Hervé Van der Heyden, M.sc.,

17 Chargé de projets

19 **31 décembre 2013** 

20 Date de dépôt du rapport final

22 Le rapport final, transmis au CDAQ en version papier et Word, doit inclure :

- ☐ les biens livrables décrits à l'annexe C de la convention de contribution financière;
- les pièces justificatives, numérotées et inscrites dans le document Plan de financement et conciliation des dépenses;
- les copies des documents de diffusion produits faisant mention de la contribution du PCAA selon les règles de visibilité du programme.





Agriculture et Agroalimentaire Canada Agriculture and Agri-Food Canada

- 29 Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) s'est engagé à travailler avec des partenaires de
- 30 l'industrie. Les opinions exprimées dans le présent document sont celles du demandeur et ne
- 31 sont pas nécessairement partagées par AAC et le CDAQ.

# Table des matières

33 34	Table des matières	
35	Table des matières	3
36	Équipe et Collaborateurs	
37	Objectifs	
38	Objectif général	
39	Objectifs spécifiques	
40	Introduction	
41	Méthodologie	
42	Résultats et discussion	
43	Diffusion des résultats	.36
44		
45	Figure 1: Sommaire des concentrations aériennes de spores de P. infestans mesurées en 20	10
46	(cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la pluviométrie	<del>)</del>
47	(barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).	17
48	Figure 2 : Sommaire des concentrations aériennes de spores de P. infestans mesurées en 20	)11
49	(cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la pluviométrie	<del>,</del>
50	(barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).	17
51	Figure 3 : Sommaire des concentrations aériennes de spores de P. infestans mesurées en 20	)12
52	(cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la pluviométrie	÷
53	(barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).	18
54	Figure 4 : Sommaire des concentrations aériennes de spores de P. infestans mesurées en 20	
55	(cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la pluviométrie	
56	(barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).	18
57	Figure 5 : Sommaire des concentrations aériennes cumulatives de spores, indice cumulatif de	
58	risque d'infection du modèle BliteCast et courbes cumulatives ajustées à l'aide du modèle	
59	Gompertz à trois paramètres pour la saison 2010.	20
60	Figure 6 : Sommaire des concentrations aériennes cumulatives de spores, indice cumulatif de	
61	risque d'infection du modèle PAMESEB et courbes cumulatives ajustées à l'aide du mod	
62	Gompertz à trois paramètres pour les saisons 2010 à 2013 (de haut en bas).	21
63	Figure 7 : Distribution des fréquences pour le ratio V/M pour la concentration aérienne de	22
64	spores de <i>P. infestans</i> pour les saisons 2010 à 2013.	22
65	Figure 8 : Relation entre le logarithme de la variance observée et le logarithme de la	22
66	concentration aérienne de spores observée.	23
67	Figure 9 : Relation entre la concentration aérienne de spores de <i>P. infestans</i> et le	4~
68	développement des symptômes de mildiou pour les pathotypes US23 et US24 (nombre de taches par faville à gaughe et incidence à draite)	
69 70	taches par feuille à gauche et incidence à droite).	24
70 71	Figure 10 : Superposition des courbes standards en spores (en noir) ainsi qu'en plasmides (e	:11 25
72	rouge). Figure 11 : Relation entre le comptage au microscope conventionnel et la quantification par	23
73	qPCR (n=23, R <sup>2</sup> =0.99).	26
74	Figure 12 : Sommaire des concentrations aériennes de spores d' <i>Alternaria sp.</i> mesurées en	20
7 <del>4</del> 75	2010 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la	
76	pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge	رد
77	pluvioniethe (barres biedes) et de la temperature et humidite relative (lighe verte et rouge	=). 27
78	Figure 13 : Sommaire des concentrations aériennes de spores d'Alternaria sp. mesurées en	<i>∠1</i>
79	2011 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la	
80	pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge	(ج
81	F.E (Salido Sidado) de do la temporataro de rialinato rolativo (ligito volto de roage	28

82	Figure 14 : Sommaire des concentrations aériennes de spores d'Alternaria sp. mesurées en
83	2012 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la
84	pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).
85	
86	Figure 15 : Sommaire des concentrations aériennes de spores d'Alternaria sp. mesurées en
87	2013 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la
88	pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).
89	2
90	Figure 16 : Régression linéaire entre la concentration aérienne de spores d'Alternaria sp. et la
91	sévérité des symptômes au champ 5 jours plus tard.
92	Figure 17 : Relation entre la sévérité et l'incidence à l'aide des données brutes (à gauche) et
93	suite à une transformation CLL (à droite).
94	Figure 18 : Ajustement de la loi de Taylor pour la concentration aérienne de spores d'Alternaria
95	sp. (haut) et la sévérité des symptômes (bas).
96	Figure 21 : Relation entre la quantité d'ADN et le nombre de spores de <i>C. coccodes</i> .
97	
98	Tableau 1 : Paramètres estimés du modèle Gompertz pour la concentration aérienne de spores
99	de P. infestans.
100	Tableau 2 : Paramètres estimés du modèle exponentiel décrivant la relation entre la
101	concentration aérienne de spores de P. infestans et le nombre de lésions de mildiou
102	produites par feuille ou son incidence.
103	Tableau 3 : Paramètres estimés du modèle Gompertz pour la concentration aérienne de spores
104	d'Alternaria sp
105	Tableau 4 : Diffusion des résultats.
106	
107	

	<u>, , , , , , , , , , , , , , , , , , , </u>	_
108	Equipe (	et Collaborateurs

- Hervé Van Der Heyden, M.sc., Professionnel de recherche, Phytodata Inc.
- Philippe Parent, Agr. M.sc. Professionnel de recherche, Directeur de la production,
- 111 Patates Dolbec
- 112 Mamadou Lamine Fall, M.sc., Modélisation
- 113 **Luc Brodeur,** Agr., Consultant
- Odile Carisse, Ph. D., épidémiologiste, Agriculture et Agroalimentaire Canada
- Laure Boulet, Agr., Avertisseure pour le RAP Pomme de Terre

## **Objectifs**

117

118

123

#### **OBJECTIF GÉNÉRAL**

- L'objectif général consistait à améliorer le contrôle des maladies fongiques de la
- pomme de terre (Solanumtuberosum) en fournissant aux producteurs des outils de
- détection précoce plus performants et précis que les systèmes de dépistage et de
- 122 prévisions traditionnels.

#### **OBJECTIFS SPÉCIFIQUES**

- 1.2.1 Valider la méthode de détection de l'inoculum aérien du mildiou de la pomme de
- terre, *Phytophtora infestans*, développée par Phytodata, et l'adapter aux conditions
- culturales (topographie, pluviométrie, etc.) de la région de la Capitale-Nationale.
- 1.2.2 Établir la relation entre les captures de sporanges de *P. infestans* et les
- 128 symptômes dépistés sur le feuillage.
- 1.2.3 Regrouper et diffuser l'information afin de la rendre accessible et permettre son
- utilisation dans des programmes de lutte intégrée.
- 1.2.4 Élargir la méthode de détection à deux autres pathogènes de la pomme de terre
- se propageant par voie aérienne : *Alternaria solani* et *Colletotrichum coccodes*.

#### Introduction

Plusieurs maladies fongiques sont très dommageables pour la culture de la pomme de terre et bien que plusieurs modèles prévisionnels soient disponibles ou à l'essai, très peu sont utilisés efficacement par les producteurs ou professionnels du secteur de la pomme de terre au Québec. De plus, aucun des ces systèmes utilisés n'intègre à l'heure actuelle la présence ou l'abondance de l'agent infectieux en cause. À ce jour, la prise de décision quant à la protection de la culture repose principalement sur les activités de dépistage : cette approche est extrêmement utile pour comparer l'efficacité des interventions fongicides, mais ne permet jamais de prévoir l'infection. De plus, les symptômes sur le feuillage ne sont observés par les dépisteurs que 5 à 10 jours après l'infection, ce qui entraîne un retard dans l'application des fongicides par rapport aux besoins de protection réels de la culture.

Depuis quelques années, on note une recrudescence des infestations de mildiou (*Phytophthora infestans mont.* De Barry) et de leur intensité (Fry and Goodwin, 1997; Smart and Fry, 2001; Lacroix, 1999; Morin, La Presse 2009). En 2009, par exemple, plus de 80% des champs de pommes de terre de la Montérégie Ouest étaient infectés par le mildiou, causant jusqu'à 100% de pertes de rendements. *Colletotrichum coccodes*, l'agent causal de la dartrose, est un autre ravageur dont l'intensité et la fréquence sont en augmentation au Québec et au Canada (Gilbert, MAPAQ, <a href="http://www.agrireseau.qc.ca/lab/documents/Dartrose.pdf">http://www.agrireseau.qc.ca/lab/documents/Dartrose.pdf</a>). Il est responsable de pertes importantes de rendement mais surtout de baisses de qualité du tubercule et de sa capacité d'entreposage. La brûlure alternarienne causée par *Alternaria solani* est aussi une maladie qui peut gagner en importance dans des conditions de stress, ou quand d'autres ravageurs ont déjà affaibli les plants.

Même si ces maladies sont relativement connues, leur recrudescence, les coûts associés à leur contrôle, les risques de résistance aux nouveaux pesticides, dont la disponibilité est limitée, sont tous des facteurs nouveaux qui font de ces maladies une problématique émergente. Par exemple, en 2009, de nombreux producteurs de pommes de terre ont subi des pertes majeures dues au mildiou, malgré une utilisation

massive de fongicides dont certains (Acrobat, Tattoo, Revus) ont été en rupture temporaire de stock.

Au Québec, on observe pour le mildiou et la brûlure alternarienne des cas de résistances à plusieurs fongicides dont le cymoxanil, le diméthomorphe, le propamocarbe-HCL, le zoxamide et le métalaxyl (AAC, 2005). En plus de causer des dommages et des pertes importantes aux producteurs, le contrôle du mildiou, de la brûlure alternarienne et de la dartrose entraine une utilisation intensive de fongicides sur des sols sensibles à une contamination de l'eau souterraine (Développement durable, Environnement et Parcs Québec, <a href="http://www.eauquebec.co">http://www.eauquebec.co</a> m/pesticides/pomme terre/index.htm).

Même si ces maladies sont bien connues, aucune méthode de détection aérienne de leur présence n'était disponible jusqu'à récemment. Une telle méthode est indispensable pour diriger les producteurs vers une bonne régie de ces pathogènes et une utilisation raisonnée des fongicides tout en assurant la qualité de la récolte. La régie recommandée par le Réseau d'Avertissements Phytosanitaires (RAP) (voir bulletin no 09 – 19 juin 2009) et la quantité de fongicides utilisée par les producteurs ou recommandée par leurs conseillers repose sur la présence ou l'absence de symptômes de mildiou et sur l'utilisation de modèles prévisionnels basés sur les conditions climatiques. Jusqu'à maintenant, la présence des agents infectieux était impossible à détecter avant l'apparition des symptômes. Ainsi, les traitements préventifs sont recommandés dès l'apparition de la maladie sur le feuillage ou avant que les rangs ne se ferment, peu importe si le mildiou a été détecté ou pas dans la zone de production.

Au Canada, la culture de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) est considérée comme étant la plus importante des cultures légumières, avec 35% de l'ensemble des recettes agricoles (Drouin, 2008). Ceci représentait une valeur à la ferme de 966 millions de dollars en 2007. Le Québec a produit 11% de la production canadienne, soit 589 000 tonnes de pomme de terre en 2007 (Statistiques Canada, 2009). Le Québec est la cinquième province en importance au Canada en ce qui a trait à la production de pomme de terre après l'Île-du-Prince-Edouard, le Manitoba, l'Alberta et le Nouveau-Brunswick. La production québécoise se fait principalement dans les régions suivantes :

la Capitale-Nationale, Laval et Lanaudière, Saguenay-Lac-St-Jean-Côte-Nord, la Montérégie Est et Ouest, le Bas-Saint-Laurent et le Centre-du-Québec (Collin, 2006). Près de la moitié des pommes de terre cultivées au Québec sont transformées en frites (16%), en croustilles (22%) ou préparées pour la semence (10%). Le reste de la production, soit 52%, est destiné au marché de la table (FPPTQ).

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

Dans le présent projet, nous nous sommes concentrés sur trois pathogènes majeurs de la pomme de terre, soient *Phytophthora infestans* (mildiou), *Alternaria solani* (brûlure alternarienne) et *Colletotrichum coccodes* (dartrose). Le mildiou et la dartrose font partie des priorités en phytopathologie pour le Québec depuis 2009. De plus, la lutte contre *P. infestans* a également été priorisée au niveau national par Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Le mildiou. Le mildiou (Phytophthora infestans) est l'agent pathogène le plus dévastateur de la pomme de terre. Il s'attaque autant à la partie aérienne de la plante qu'aux tubercules. Lorsque les conditions sont favorables, les sporanges transportées par le vent se déposent sur les feuilles où des lésions se développent 4 à 8 jours plus tard et provoquent la défoliation du plant. Par la suite, des lésions peuvent aussi apparaître sur le tubercule. La présence du mildiou dans un champ peut provoquer la perte totale de la production en peu de temps. Récemment, l'apparition du type sexué A2 a compliqué la gestion du mildiou. En effet, le type sexué A2 est plus agressif et plus difficile à contrôler. Il remplace graduellement le type A1 que nous retrouvions exclusivement au Québec avant 1994. La majorité des producteurs utilise la méthode du calendrier, qui consiste à appliquer de manière prophylactique un fongicide aux 5 à 7 jours depuis l'émergence du plant jusqu'au défanage. En conséguence, le producteur applique un fongicide en ne sachant pas s'il y a présence ou non de l'agent pathogène. P. infestans hiverne sous forme de mycélium dans les tubercules entreposés, dans les tas de rebus et dans les champs de pomme de terre ou autres plantes hôtes. Au printemps, l'agent pathogène produit des sporanges qui sont dispersées par le vent. Lorsque les conditions sont favorables, des cycles rapides de sporulation/infection sont alors enclenchés et l'inoculum peut ainsi être dispersé dans d'autres champs et dans d'autres régions. Rapidement, le mildiou peut dévaster un champ entier. Les tubercules sont infectés quand des spores sont délogées du plant et sont entraînées par l'eau

dans le sol jusqu'aux tubercules. Les spores commencent à germer à leur température optimale, comprise entre 10-15°C et une humidité relative au-dessus de 90%.

La brûlure hâtive. La brûlure alternarienne (Alternaria solani) peut être responsable d'une perte de rendement si l'infection couvre une grande partie de la feuille. La maladie peut s'attaquer aussi au tubercule, entraînant des lésions. La maladie peut progresser lors de l'entreposage, provoquant l'assèchement et la perte du tubercule. A. solani hiverne sur des feuilles ou des tiges infectées, sur des tubercules, dans le sol ou autres plantes hôtes. Le matériel infecté produit des spores qui se dispersent par le vent. Celles-ci atteignent une feuille où elles peuvent germer et se développer. Les symptômes n'apparaissent pas tout de suite, d'où l'importance d'avoir une méthode de détection précoce de la maladie. La formation de spores est optimale quand les nuits sont au-dessous de 15°C, avec une forte rosée ou une pluie. La brûlure hâtive se diffuse rapidement lorsqu'il y a alternance de temps sec et humide, les conditions sèches favorisant la dispersion des spores par le vent.

La dartrose. Bien que cette maladie soit considérée de moindre importance, le réseau de dépistage PRISME a observé une récente émergence de cette maladie en Montérégie. Le MAPAQ souligne que cette maladie a pris de l'importance avec le développement du marché de la transformation de la pomme de terre (source : Laboratoire de diagnostic en phytoprotection). La dartrose affecte surtout les plants stressés et infecte les feuilles et les tubercules. Lorsque les feuilles sont infectées, une défoliation peut être observée. L'infection des tubercules peut provoquer la mort hâtive du plant et la rupture des stolons. Sur le tubercule, C. coccodes cause une accumulation de sucres réducteurs au niveau du talon, provoquant un noircissement du tubercule lors de la cuisson. Les symptômes peuvent se manifester tardivement à l'automne, plusieurs jours après l'infection, d'où l'importance de détecter la présence de ce pathogène très tôt. C. coccodes est un parasite obligatoire. Il hiverne dans les vieilles plantes fanées de pommes de terre ou sur les tubercules laissés au champ ou en entrepôt. Bien que la maladie se propage principalement par des semences infectées, des spores peuvent être disséminées par le vent. Comme la présence de ce champignon est de plus en plus observée, il est nécessaire d'évaluer son importance dans l'air. La dartrose préfère les sols légers, chauds, humides et pauvres en azote.

Situation désirée. Au terme du projet, les producteurs et professionnels du secteur de la pomme de terre de la région de la Capitale-Nationale auront accès à un nouvel outil de détection des agents pathogènes aérotransportés. La mesure de l'inoculum aérien se traduira par la détection précoce des agents pathogènes, avant infection, et assurera des gains importants auprès des producteurs. En effet, cette méthode permettra de rationaliser l'utilisation des fongicides, de minimiser les pertes, de réduire les coûts et d'augmenter la durée de vie utile des matières actives en diminuant les risques de développement de la résistance aux fongicides. Dans le cadre d'un projet financé par la Stratégie Phytosanitaire, Phytodata a démontré qu'il était possible de détecter les sporanges du mildiou à l'aide de capteurs de spores avant que n'apparaissent les symptômes sur le feuillage. Ceci est possible car les spores de *P. infestans* sont libérées et infectent le feuillage 4 à 8 jours avant l'apparition des symptômes.

Au cours des saisons 2008 et 2009, Phytodata a testé l'efficacité de l'utilisation des capteurs de spores pour détecter le mildiou dans des champs de pommes de terre dans la région de la Montérégie Ouest. Au cours de la saison 2008, les capteurs de spores ont permis de retarder les premiers traitements jusqu'à la mi-juillet, soit bien après que les rangs se soient fermés. Cette détection tardive des premières spores a permis de réduire le nombre de traitements de 61,5% au cours de la saison 2008: seulement deux traitements ont dû être effectués au lieu de six dans la régie conventionnelle basée sur le dépistage et les recommandations du RAP. Cette réduction de l'utilisation de fongicides a aussi eu une incidence marquée sur l'indice de risque des pesticides du Québec, autant pour l'environnement (réduction de 30%) que pour la santé (réduction de 64%).

La situation fut différente en 2009, alors que les spores ont été capturées dès le début du mois de juin. Des traitements ont alors été recommandés quand les plants ne mesuraient que quelques centimètres, peu après l'émergence. Cette détection précoce des sporanges de mildiou a permis de cibler plus adéquatement l'initiation de la régie de traitements fongicides et a permis de réduire l'emploi répété de fongicides à risques élevés de développement de résistance (exemple Curzate 60 DF). Bien que l'agent pathogène du mildiou de la pomme de terre soit le plus destructeur pour la pomme de

terre, *Alternaria solani* peut également causer d'importantes pertes de rendement. Une récente étude espagnole a démontré qu'il était possible de capturer et quantifier les concentrations aériennes de spores *d'A. solani* (Iglesias et al, 2006). Ainsi, il est possible d'en faire la détection et le suivi.

## Méthodologie

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

Sites et collecte des données : Les données ont été recueillies entre 2010 et 2013 en conditions commerciales dans la région de Québec. Chaque année, six sites ont été implantés dans des champs en production par Patates Dolbec inc. Les sites ont été installés les 16 juin, 23 juin, 23 juin et 26 juin en 2010, 2011, 2012 et 2013, respectivement. Des sites d'essais ont également été installés en Montérégie-Ouest en 2011, 2012 et 2013. Les sites ont été sélectionnés en fonction de leur historique de production et de leur distribution sur la zone de production. Pour mesurer la concentration aérienne de spores, trois capteurs de spores de type Rotorod ont été installés dans chaque site, deux à l'intérieur et à un à l'extérieur du champ. Ces capteurs échantillonnaient l'air 50% du temps entre 6h et 15h, 3 fois par semaine (à intervalles de 10 minutes), pour un total de 4.5 heures par période d'échantillonnage. Les bâtonnets (dispositif d'échantillonnage) ont été récoltés 3 fois par semaine, soit le jour de l'échantillonnage d'air ou le lendemain. Lors de pulvérisations, les bâtonnets étaient récoltés immédiatement après le délai de réentrée au champ. Le comptage des spores a été fait au microscope optique à un grossissement de 200X. Le comptage a d'abord été réalisé sur place, dans les locaux de Patates Dolbec inc., sous la supervision de Philippe Parent. Le second bâtonnet a été envoyé au personnel de Phytodata Inc. pour un recomptage systématique. Le second bâtonnet a également servi à valider les méthodes moléculaires développées dans le cadre de d'autres projets de recherche ou celles adaptées de la littérature.

Dans chacun des sites, des données météorologiques ont été recueillies à l'aide de stations météo automatisées de type WatchDog, modèle 2700. Ces stations enregistrent les données de pluviométrie, de température, d'humidité relative ainsi que la vitesse et la direction du vent. La fréquence d'acquisition de ces stations météo est réglée aux 15 minutes afin d'obtenir des moyennes horaires. Les données

météorologiques recueillies ont été importées dans le système expert Datatrace afin de faciliter leur utilisation, ainsi que leur intégration dans le calcul des indices de risques d'infection.

Suivi du développement des maladies de la pomme de terre : Un dépistage hebdomadaire de chaque site a été effectué de l'émergence des plantons jusqu'au défanage. Dans chaque site, 50 plants ont été évalués aléatoirement dans un rayon de 10 mètres autour de chaque capteur de spores. L'incidence et la sévérité de chacune des maladies ont été recueillies. La sévérité a été reportée sur une échelle de 0 à 5 représentant la position des symptômes sur le plant, l'abondance des symptômes et le pourcentage du plant infecté. En 2010, seul le mildiou de la pomme de terre a été dépisté. En 2011, le mildiou et l'alternaria ont été suivis et en 2012-2013, le mildiou, l'alternaria et la dartrose ont été suivis.

Modèles bioclimatiques de prédiction du risque: En 2010, le modèle BliteCast a été utilisé pour la prédiction des périodes de risque d'infection du mildiou de la pomme de terre. Ce modèle, le plus simple disponible, ne nécessite que des données horaires de température et d'humidité relative. L'équation du modèle a été intégrée dans le système expert Datatrace et les indices de risque ont pu être générés à la demande. En 2012 et 2013, le modèle prévisionnel PAMESEB a été préféré au modèle BliteCast. Les équations du modèle PAMESEB ont également été intégrées à Datatrace pour faciliter leur utilisation et pouvoir générer les indices de risques à la demande.

Analyses temporelles: À chaque année, la progression temporelle de la concentration aérienne de spores de *P. infestans* et d'Alternaria sp., des indices de risque cumulés et des symptômes des maladies a été décrite grâce à l'utilisation de modèles sigmoïdes. Le modèle Gompertz à trois paramètres décrit par l'équation suivante a été retenu:

$$y = ae^{e^{-((x-x_0)/b)}}$$

où a représente l'asymptote,  $x_0$  le temps ou y atteint la moitié de son amplitude, et b la pente de la portion linéaire de la courbe. Le modèle le plus adéquat a été sélectionné

en considérant plusieurs paramètres statistiques (Somme des carrés (SSE), erreurtype (RMSE) et coefficient de détermination (R<sup>2</sup>)).

Analyse de la variation spatiale : Pour la distribution des concentrations aériennes de spores (CAS) et la distribution des symptômes, la première approche utilisée consistait à calculer le ratio variance sur moyenne (V/M). Cette approche se veut une approche exploratoire qui a servi à l'orientation des analyses subséquentes. Un ratio V/M inférieur à 1 suggère une distribution spatiale régulière, égal à 1 une distribution aléatoire et supérieur à 1 une distribution agrégée. Si la distribution est considérée comme étant aléatoire, le ratio  $V/M^*(n-1)$  suit une distribution de  $kh\hat{r}^2$  de n-1 degrés de liberté où n est le nombre d'échantillons. La seconde approche utilisée consistait à calculer l'indice de dispersion D :

$$D = \frac{S_y^2}{\overline{y(1-y)}/n}$$

où  $S_y^2$  est la variance observée et y(1-y)/n est la variance calculée sous l'hypothèse d'une distribution complètement aléatoire. Si les deux variances sont égales, D=1 et on peut conclure à une distribution complètement aléatoire. Plus la valeur de D augmente, plus la distribution s'éloigne d'une distribution complètement aléatoire et s'approche d'une distribution agrégée. Si la distribution est considérée comme étant aléatoire, D\*(n-1) suit également une distribution de  $khl^2$  de n-1 degré de liberté et n échantillons.

La troisième approche tient compte de la distribution à la fois dans l'espace et dans le temps. Elle repose sur l'utilisation de la loi de puissance de Taylor. En effet, cette approche permet de quantifier le niveau d'hétérogénéité entre les CAS ou incidence prélevées à différentes dates. La loi de puissance de Taylor décrit la relation entre la variance observée ( $s_{obs}^2$ ) et la moyenne observée ( $\overline{Y}$ ) selon l'équation suivante :

$$S_{phs}^{2} = A \overline{Y}^{b}$$

En prenant le logarithme naturel de chaque côté de l'équation, on obtient la relation linéaire suivante :

$$ln(S_{obs}^2) = ln(A) + bln(\overline{Y})$$

L'ordonnée à l'origine (ln(A)) et la pente (b) de l'équation ont été estimées à l'aide d'une régression linéaire. Pour les données d'incidence, c'est la forme binaire de la loi de puissance de Taylor qui a été utilisée. Dans cette forme, la variance binomiale remplace la moyenne de la loi de puissance de Taylor qui a été utilisée.

$$\ln(V_{obs}) = \ln(A_{v}) + b\ln(y(1-y)/n)$$

Pour l'interprétation des résultats, lorsque  $\ln(A)$  ou  $\ln(A_x)$  et b sont égal à 1, on peut conclure à un processus complètement aléatoire. Lorsque  $\ln(A)$  ou  $\ln(A_x)$  est supérieur à 1 et b est égal à 1, le processus est considéré comme étant agrégé, mais l'agrégation n'est pas influencée par la moyenne. Enfin, lorsque  $\ln(A)$  ou  $\ln(A_x)$  et b sont supérieurs à 1, alors l'agrégation est directement influencée par la moyenne observée.

Établir la relation entre la CAS de P. infestans et les symptômes de mildiou. Un cabinet de croissance a été divisé en deux grandes sections A et B, A représentant la section réservée aux plants de pommes de terre infectés (source de sporanges) et B représentant la section réservée aux plants de pommes de terre sains (20 plants). Ces deux sections étaient connectées pour permettre la circulation d'air entre elles et, par ailleurs, celle des sporanges de P. infestans. Deux échantillonneurs de spores ont été installés dans ce cabinet à 50 cm de hauteur au-dessus des plants sains. Après une durée de 24 h, les plants de la section A ont été retirés du cabinet, qui a ensuite été maintenu à la noirceur pendant 8h puis à 12 h de noirceur, 12h d'éclairage pendant 6 jours. L'humidité relative et la température ont été maintenues à 90% et 18°C tout au long de l'expérience. Le développement de la maladie a été évalué après sept jours, par un échantillonnage aléatoire de 5 feuilles par plant. La proportion de plants avec des symptômes (incidence) et le nombre de lésions ont été déterminés.

Diffusion des résultats: Chaque site a été géo-référencé et cartographié afin que la diffusion des résultats aux conseillers et avertisseurs du réseau Québécois soient disponibles sur une page du site internet du Consortium Prisme. Les données relatives à chaque champ dans chacun des secteurs de production de la région de la Capitale-Nationale étaient accessibles à partir de cartes interactives et présentées sur le site internet sous forme de tableaux (données météo réelles, température et humidité relative, comptage des spores, niveaux d'infection et prévisions météo) et sous forme graphique.

#### Résultats et discussion

401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

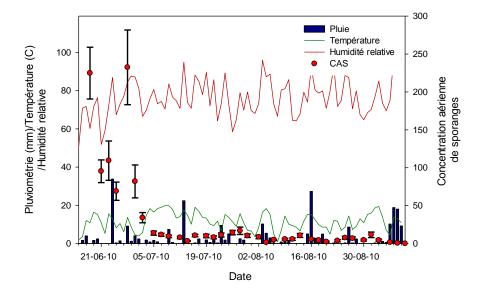
418

419

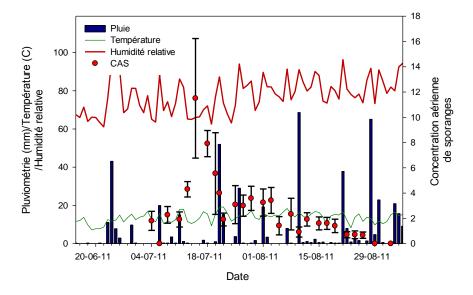
420

421

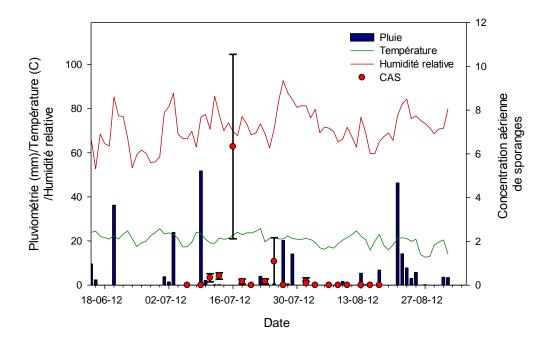
Concentrations aériennes de spores de P. infestans : Globalement, un peu plus de 1400 échantillons aériens ont été recueillis entre 2010 et 2013. Phytophthora infestans a été observé sur 40% des échantillons. En 2010, la concentration aérienne de spores (CAS) moyenne de P. infestans était de 33 spores/bâtonnet, avec un maximum observé de 500 spores et un minimum de 0 (Figure 1). Le nombre de captures moyen a fortement été influencé par le premier tiers de la saison, période au cours de laquelle on a pu observer la capture maximum. Pour 2010, l'échantillonnage a été réalisé sur une période de 84 jours, pour un total de 384 échantillons recueillis. Sur les 384 échantillons, la présence de spores de P. infestans a été observée sur 293 échantillons, soit 78% du temps. En 2011, les CAS moyennes de P. infestans étaient très faibles par rapport à 2010. Elles variaient entre 0 et 10 spores/bâtonnet avec un maximum observé de 42 spores/bâtonnet le 15 juillet (Figure 2). En 2011, sur les 336 échantillons qui ont été recueillis, la présence de P. infestans a été observée sur 151 échantillons soit seulement 45% du temps. En 2012, les CAS observées étaient également très faibles, alors que P. infestans n'a été observé que sur 20 échantillons seulement, soit dans seulement 8% des batônnets (Figure 3). Un maximum de 40 spores/bâtonnet a été observé le 16 juillet. En 2013, les CAS de P. infestans observées étaient également faibles. Le nombre moyen de spores capturées variait de 0 à 10 spores/bâtonnet, avec un maximum observé de 27 spores/bâtonnet le 10 juillet (Figure 4). En 2013, P. infestans a été observé sur 28% des échantillons recueillis.



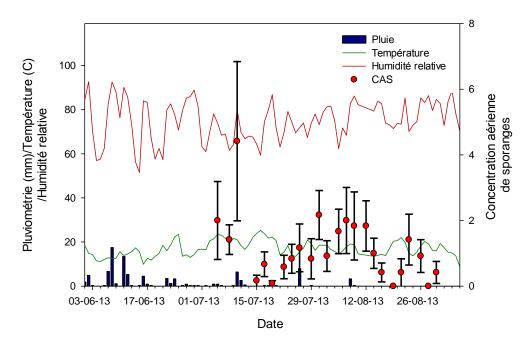
**Figure 1:** Sommaire des concentrations aériennes de spores de *P. infestans* mesurées en 2010 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).



**Figure 2 :** Sommaire des concentrations aériennes de spores de *P. infestans* mesurées en 2011 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).



**Figure 3 :** Sommaire des concentrations aériennes de spores de *P. infestans* mesurées en 2012 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).



**Figure 4 :** Sommaire des concentrations aériennes de spores de *P. infestans* mesurées en 2013 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la

pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).

 En général la concentration aérienne de spores observée était beaucoup plus importante en 2010 que toutes les autres saisons. Les spores de *P. infestans* ont été détectées plus tôt et les maximums ont également été observés plus tôt (Figure 5). Ces résultats sont en accord avec les résultats attendus. En effet, la saison précédente (2009) s'est avérée être la plus importante saison à mildiou de la pomme de terre depuis le milieu des années 90. Ainsi, il est possible de croire que dans les régions de productions touchées par l'épiphytie de mildiou de 2009, un certain inoculum résiduel soit responsable de l'importance des captures effectuées au printemps 2010. Cet inoculum résiduel peut provenir de résidus de cultures de l'année précédente ou de tas de rebus provenant d'entreprises productrices ou encore de potagers résidentiels.

La modélisation des séries temporelles à l'aide du modèle Gompertz a permis de quantifier la différence entre les épiphyties entre 2010 et 2013. Le modèle sélectionné a permis une description adéquate de toutes les épiphyties et l'identification des différences et similitudes de chacune des séries (Tableau 1). Le paramètre a indique la valeur maximale de la courbe cumulative et est un indicateur de l'importance de la concentration aérienne cumulative observée. Ainsi, la valeur de a était de 1008.78, 70.24, 40.03 et 8.56 spores par bâtonnets en 2010, 2011, 2012 et 2013, respectivement (Tableau 1). Parmi les paramètres d'intérêt, la valeur de  $X_0$  correspond au moment où l'épiphytie atteint le second point d'inflexion; en d'autres mots, il s'agit du moment où le nombre de spores est au maximum et conséquemment le moment où le risque est le plus élevé. Hormis pour la saison 2010 où le  $X_0$  calculé était de 172.19, cette valeur est atteinte autour du  $200^e$  jour de l'année (20 juillet) (Tableau 1).

Le modèle Gompertz à trois paramètres a également pu être utilisé pour modéliser les courbes d'estimation du risque d'infection prédites par le modèle BliteCast en 2010, ainsi que par le modèle PAMESEB entre 2010 et 2013. L'utilisation du modèle BliteCast a été abandonnée après la saison 2010 en raison de son incapacité à prévoir une période de risque d'infection avant le  $X_0$  ou le172<sup>e</sup> jour de 2010 (Figure 5). Pour ce qui est du modèle PAMESEB, il semble que ce dernier surestime un peu les risques

d'infection, même si la valeur calculée de  $X_0$  est légèrement en retard par rapport au suivi de la concentration aérienne de spores (Tableau 1, Figure 6).

**Tableau 1 :** Paramètres estimés du modèle Gompertz pour la concentration aérienne de spores de *P. infestans*.

Année	a (SE)	b (SE)	X <sub>0</sub> (SE)	$R^2$	р
CAS 2010	1008.78 (9.67)	7.99 (0.66)	172.19 (0.50)	0.95	<0.001
CAS 2011	70.24 (0.87)	9.68 (0.50)	198.35 (0.32)	0.99	< 0.001
CAS 2012	8.56 (0.16)	1.55 (0.28)	196.13 (0.307)	0.97	< 0.001
CAS 2013	40.03 (6.06)	28.70 (5.52)	211.68 (4.96)	0.96	<0.001
BliteCast 2010	178.81 (3.69)	23.12 (0.92)	203.45 (0.66)	0.99	<0.001
Pameseb 2010	1211.69 (57.58)	47.18 (2.79)	204.11 (2.63)	0.99	<0.001
Pameseb 2011	1937.39 (44.11)	43.75 (1.33)	214.13 (1.22)	0.99	<0.001
Pameseb 2012	10739.54 (232.23)	42.47 (1.08)	211.27 (1.08)	0.99	<0.001
Pameseb 2013	13381.17 (662.41)	50.19 (2.62)	215.11 (2.82)	0.99	<0.001

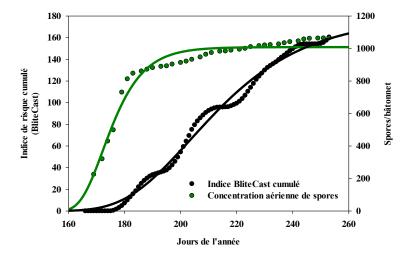
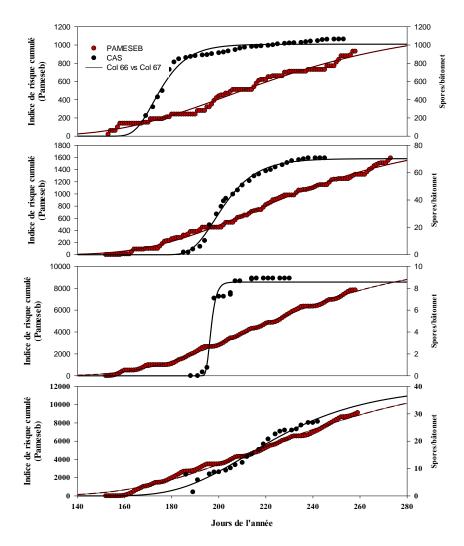
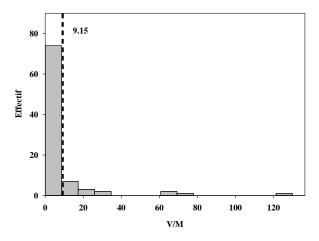


Figure 5: Sommaire des concentrations aériennes cumulatives de spores, indice cumulatif de risque d'infection du modèle BliteCast et courbes cumulatives ajustées à l'aide du modèle Gompertz à trois paramètres pour la saison 2010.



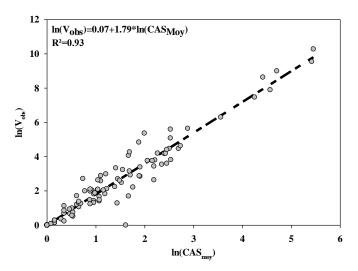
**Figure 6 :** Sommaire des concentrations aériennes cumulatives de spores, indice cumulatif de risque d'infection du modèle PAMESEB et courbes cumulatives ajustées à l'aide du modèle Gompertz à trois paramètres pour les saisons 2010 à 2013 (de haut en bas).



**Figure 7 :** Distribution des fréquences pour le ratio V/M pour la concentration aérienne de spores de *P. infestans* pour les saisons 2010 à 2013.

Pour la majorité des dates d'échantillonnage (88%), le ratio V/M s'est avéré être significativement supérieur à 1 (basé sur les résultats d'un test de khi²) (Figure 7) et la valeur moyenne était de 9.15. Basé sur ces analyses, les CAS de *P. infestans* étaient considérées comme agrégées pour la plupart des dates d'échantillonnage. Ces résultats sont supportés par ceux obtenus au Nouveau-Brunswick, où la CAS était également considérée comme agrégée dans 94% du temps (Fall et al., sous presse).

L'ajustement de la loi de Taylor, décrivant la relation entre la variance observée et la CAS moyenne, est présenté à la figure 8. La loi de puissance de Taylor a permis une bonne description de cette relation (R²=0.93). L'ordonnée à l'origine n'était pas différente de 0 (0.007) et la pente de la régression de Taylor était significativement supérieure à 1 (1.79) (Figure 8). Ainsi, nous avons décelé la présence d'hétérogénéité à travers les jeux de données et celle-ci est proportionnelle à l'augmentation des concentrations aériennes de spores. Un test de covariance a cependant révélé que l'année d'échantillonnage avait un effet sur l'ordonnée à l'origine et la pente de la régression. En effet, la pente de la régression de Taylor était significativement plus grande pour la saison 2010.



**Figure 8 :** Relation entre le logarithme de la variance observée et le logarithme de la concentration aérienne de spores observée.

L'étude du mildiou de la pomme de terre présente des difficultés qui ne peuvent pas facilement être contournées. En effet, même si au Québec on rapporte des cas isolés de mildiou de la pomme de terre chaque année, la récurrence des épiphyties de mildiou n'est cependant que de 3 à 5 ans. Ainsi, pour résoudre en partie cette contrainte, la corrélation entre la concentration aérienne de spores de *P. infestans* et le développement des symptômes sur le feuillage a été estimée en laboratoire (cabinets de croissance).

**Tableau 2:** Paramètres estimés du modèle exponentiel décrivant la relation entre la concentration aérienne de spores de *P. infestans* et le nombre de lésions de mildiou produites par feuille ou son incidence.

Variables	RACE	a(SE)	b(SE)	R <sup>2</sup>	р
Lésions par feuille	US-23	3.57 (0.57)	0.04 (0.01)	0.97	<0.001
	US-24	2.01 (0.20)	0.06 (0.01)	0.96	<0.001
Incidence	US-23	0.82 (0.11)	0.11 (0.03)	0.83	<0.001
	US-24	0.90 (0.11)	0.09 (0.02)	0.88	<0.001

L'analyse de ces données a permis de mettre en évidence une relation de type exponentielle entre la CAS et l'incidence ou le nombre de lésion par feuille. Cette

relation exponentielle a été décrite pour deux pathotypes différents soit: US-23 et US-24. Ces souches ont notamment été recueillies en Montérégie-Ouest dans le cadre de ce projet de recherche. L'équation exponentielle s'est avérée décrire adéquatement la relation entre la CAS et le nombre de lésions produites ou l'incidence tant pour US-23  $(R^2=0.97 \text{ et } R^2=0.83)$  que pour US-24  $(R^2=0.96 \text{ et } R2=0.88)$  (Tableau 2). Il est cependant intéressant de constater que l'efficacité d'infection du pathotype US-23 semble plus importante que celle du pathotype US-24 (Figure 9). En effet, une concentration aérienne d'environ 10 spores/m<sup>3</sup> de US-23 engendrait une incidence 50% alors que la même concentration de spores de US-24 produisait une incidence d'environ 20% (Figure 9). Bien qu'elle soit moins importante, cette différence entre les deux pathotypes est également présente lorsque la CAS est comparée au nombre de taches par feuille (Figure 9). Ces résultats peuvent expliquer en partie l'effet dévastateur qu'a eu l'épiphytie de 2009, causée principalement par le pathotype US-23 et 2010, lors de sa première apparition à l'est du Canada (Kalischuk et al., 2012). De plus, depuis son apparition, US-23 domine la population de P.infestans à l'est du Canada (Kalischuk et al., 2012).

525

526

527

528

529

530

531

532

533

534

535

536

537

538

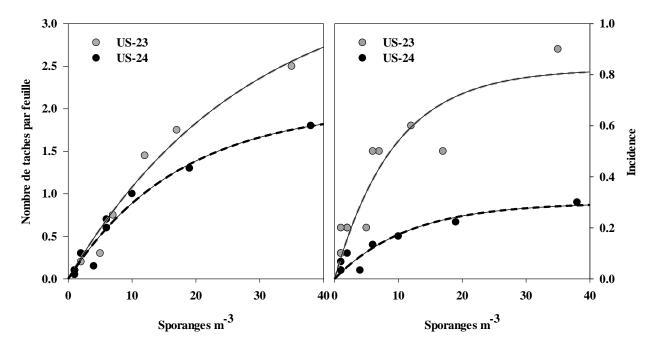
539

540

541

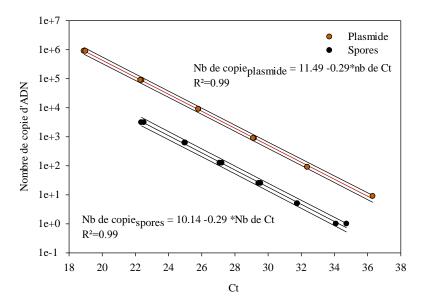
542

543

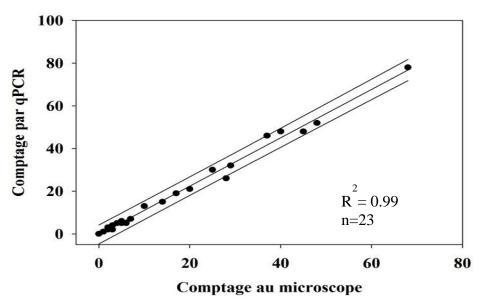


**Figure 9 :** Relation entre la concentration aérienne de spores de *P. infestans* et le développement des symptômes de mildiou pour les pathotypes US23 et US24 (nombre de taches par feuille à gauche et incidence à droite).

Travaux complémentaires: validation d'un test de quantification moléculaire des spores de P. infestans: Dans le cadre du projet DPAI-1938, un marqueur moléculaire a été développé afin d'identifier et dénombrer les spores de P. infestans à partir d'échantillons aériens. Une méthode d'extraction permettant de recueillir le matériel génétique contenu à la surface des bâtonnets a été développée, ainsi qu'une paire d'amorces et une sonde TaqMan spécifiques à P. infestans. Les résultats qui sont présentés subséquemment sont le fruit des tests de validation exécutés dans le laboratoire de PRISME en 2013.



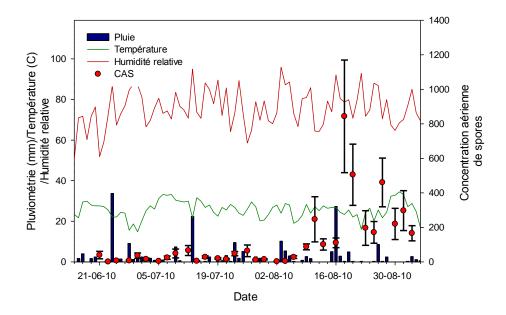
**Figure 10**: Superposition des courbes standards en spores (en noir) ainsi qu'en plasmides (en rouge).



**Figure 11 :** Relation entre le comptage au microscope conventionnel et la quantification par qPCR (n=23, R<sup>2</sup>=0.99).

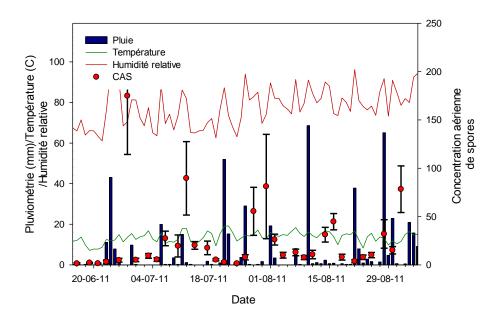
Les courbes standards en plasmides et les courbes standards en spores se sont avérées être parallèles ( $b_0 = -0.29$ ), ce qui est nécessaire au développement de l'équation permettant le dénombrement des spores (Figure 10). Une fois les courbes standards superposées, il est possible d'utiliser uniquement la courbe en plasmides(?), qui est plus simple à réaliser et ne nécessite pas de maintenir l'agent pathogène en production. Ainsi, grâce à la nouvelle courbe standard, nous avons pu valider le comptage effectué au microscope. La relation entre les comptages au microscope et les comptages en biologie moléculaire sont linéaires ( $R^2$ =0.99) et la pente de la régression n'est pas différente de 1 (Figure 11).

Étendre la méthode de détection à d'autres pathogènes de la pomme de terre : Alternaria spp. : Les concentrations aériennes de spores d'Alternaria sp., ont été mesurées en même temps et sur les mêmes bâtonnets que les concentrations aériennes de *P. infestans*. En 2010, la concentration moyenne quotidienne de spores était de 110 spores par bâtonnet. Le maximum observé a été de 3397 spores par bâtonnets (609 spores/m³ d'air) le 18 août, tandis que le minimum était de zéro (Figure 12).



**Figure 12:** Sommaire des concentrations aériennes de spores d'*Alternaria sp.* mesurées en 2010 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).

En 2011, les CAS d'Al*ternaria spp.* ont varié davantage du début à la fin de la saison. Les captures ont oscillé entre 0 et 413 spores par bâtonnet (entre 0 et 75 spores/m³ d'air) avec un maximum de 413 spores (75 spores/ m³ d'air) observé le 17 août (Figure 13). En 2012, les captures moyennes ont oscillé entre 0 et 112 spores par bâtonnet (entre 0 et 20 spores/m³ d'air) avec un maximum de 467 spores (83,76 spores/ m³ d'air) observé le 31 août (Figure 14).



**Figure 13**: Sommaire des concentrations aériennes de spores d'*Alternaria sp.* mesurées en 2011 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).

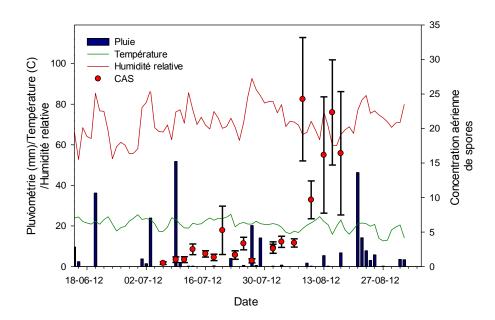
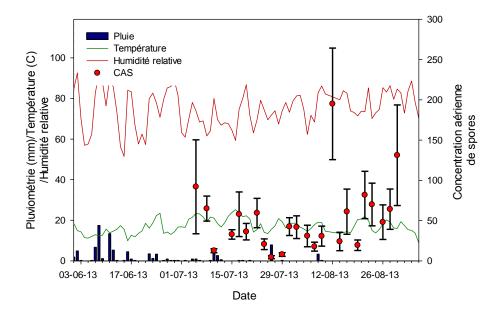


Figure 14 : Sommaire des concentrations aériennes de spores d'*Alternaria sp.* mesurées en 2012 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).



**Figure 15 :** Sommaire des concentrations aériennes de spores d'*Alternaria sp.* mesurées en 2013 (cercles rouges) et erreur-type représentant la variation entre les sites, de la pluviométrie (barres bleues) et de la température et humidité relative (ligne verte et rouge).

En 2013, les captures ont oscillé entre 0 et 52 spores par bâtonnet en moyenne (entre 0 et 9.3 spores/m³ d'air) avec un maximum de 853 spores (152 spores/ m³ d'air) observé le 12 août 2013 (Figure 15). En général, la concentration aérienne de spores d'*Alternaria sp.* observée était relativement constante d'une saison à l'autre. Ces résultats sont également en accord avec les résultats attendus. Les *Alternaria* sont des pathogènes relativement polyphages qui peuvent dans certains cas avoir jusqu'à 900 hôtes (*Alternaria alternata* 986 hôtes et *Alternaria solani* 74 hôtes) (Ref).

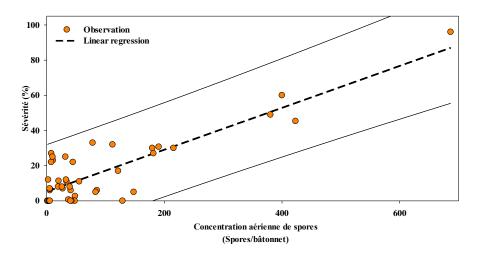
La modélisation des séries temporelles à l'aide du modèle Gompertz a permis de quantifier les différences et similitudes entre les épiphyties de 2010 à 2013. Le modèle sélectionné a permis une description adéquate de toutes les épiphyties, sauf pour 2012 (Tableau 3). Le paramètre a indique la valeur maximale de la courbe cumulative et est un indicateur de l'importance de la concentration aérienne cumulative observée. Ainsi, la valeur de a était de 2.25, 0.99 et 7.08 spores par bâtonnets en 2010, 2011 et 2013,

respectivement (Tableau 3). Pour ce qui est du maximum observé, il a toujours été atteint au cours de la seconde moitié du mois d'août, soit entre le 12 et le 31 août.

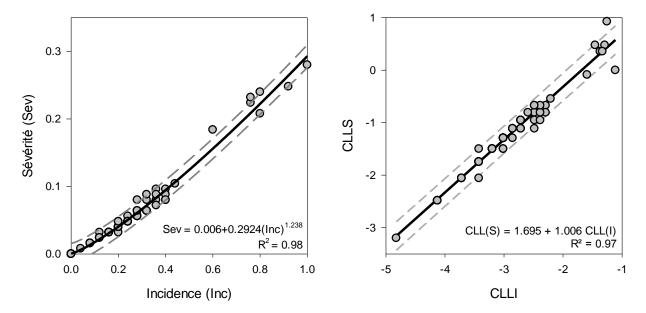
**Tableau 3 :** Paramètres estimés du modèle Gompertz pour la concentration aérienne de spores d'*Alternaria sp.*.

Année	a (SE)	b (SE)	X <sub>0</sub> (SE)	$R^2$	р
CAS 2010	2.25 (0.55)	26.88 (4.86)	246.04 (6.75)	0.98	<0.001
CAS 2011	0.99 (0.01)	9.68 (0.50)	198.35 (0.32)	0.99	< 0.001
CAS 2012	- (-)	134.29 (169.67)	559.48	0.98	< 0.001
			(598.04)		
CAS 2013	7.08 (6.24)	72.86 (24.64)	292.05 (48.65)	0.98	<0.001

Contrairement à *P. infestans*, l'évaluation des symptômes de brûlure hâtive est plus facile à faire au champ et la corrélation directe entre les deux indicateurs est envisageable. Ainsi, les résultats que nous avons obtenus ont permis d'identifier la présence d'une relation linéaire positive entre la CAS et la sévérité observée avec un délai de 5 jours (R²=0.74) (Figure 16). La pente de la régression est de 5.23 et l'ordonnée à l'origine 0.12. Ces résultats suggèrent donc que nous disposons d'une fenêtre de prédiction du risque d'environ 5 jours. De plus, ces résultats suggèrent qu'une CAS d'environ 10 spores/m³ d'air est nécessaire pour occasionner une sévérité de 10% et environ 30 spores/m³ d'air pour une sévérité d'environ 20%. Ainsi, les seuils d'intervention pour la brûlure hâtive devraient se situer entre ces deux valeurs.



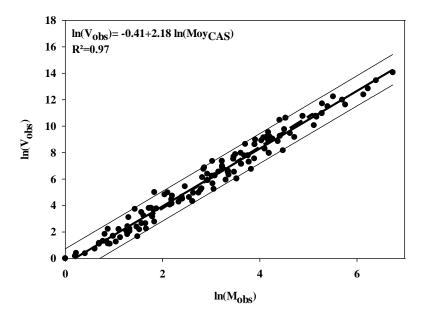
**Figure 16 :** Régression linéaire entre la concentration aérienne de spores d'*Alternaria sp.* et la sévérité des symptômes au champ 5 jours plus tard.

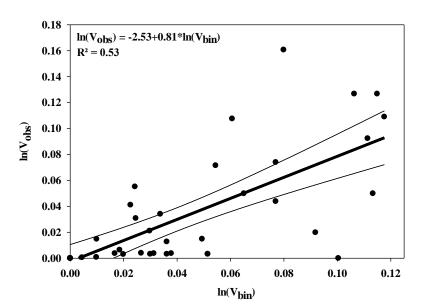


**Figure 17:** Relation entre la sévérité et l'incidence à l'aide des données brutes (à gauche) et suite à une transformation CLL (à droite).

L'analyse des données d'évaluation des symptômes permet de déterminer et décrire la relation entre sévérité et incidence et de faire une sélection du paramètre de dépistage qui serait le plus adéquat à suivre. La transformation CLL (Log-Log) a permis d'obtenir une relation linéaire simple entre les données transformées de sévérité et d'incidence. Cette relation décrite par l'équation CLL(S) = 1.695 + 1.006 CCL(I) où a = 1.695 et b = 1.006, permet d'expliquer une proportion élevée de la variabilité ( $R^2 = 0.97$ ) (Figure 17). Dans ce cas, les résultats suggèrent que l'incidence est un bon indicateur de la sévérité tant que celle-ci reste en dessous de 30% de la surface foliaire affectée.

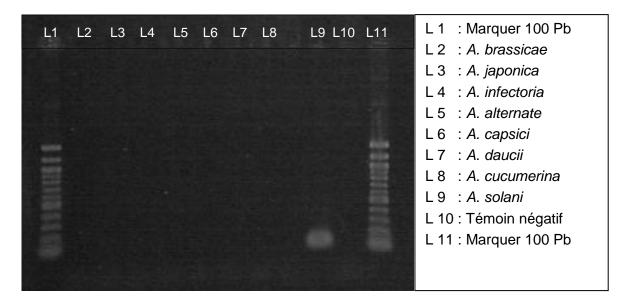
Afin de vérifier la relation entre moyenne et variance, la loi de puissance de Taylor a également été utilisée pour la CAS et pour la sévérité des symptômes. Pour la CAS d'*Alternaria sp.*, la régression de Taylor permet de décrire l'hétérogénéité globale ( $R^2 = 0.97$ ) (Figure 18). La pente de la régression était significativement supérieure à 1 et l'ordonnée à l'origine n'était pas différente de 0. Cependant, la loi de Taylor n'est pas aussi adéquate pour la description des symptômes de brûlure hâtive (Figure 18) ( $R^2 = 0.53$ ). En effet, la pente de la régression n'est pas différente de 1, suggérant un processus complètement aléatoire.





**Figure 18 :** Ajustement de la loi de Taylor pour la concentration aérienne de spores d'*Alternaria sp.* (haut) et la sévérité des symptômes (bas).

Travaux complémentaires : validation d'un test moléculaire pour l'identification des spores d'Alternaria solani: Une paire d'amorces a été développée à partir d'une séquence d'ADN d'Alternaria solani en la comparant avec les séquences d'ADN de 10



**Figure 19 :** Résultats préliminaires partiels des tests de spécificité. Les puits L2 à L8 contiennent de l'ADN de différentes espèces d'*Alternaria* qui n'a pas été amplifié (absence de bande) avec les amorces développées pour *Alternaria solani*.

autres Alternaria (A. brassicae, A. brassicicola, A. gaisen, A. perangusta, A. turkisafria, A. longipes, A. citrimacularis, A. tenuissima, A. citriarbusti, A. alternata) et de Lewia infectoria et Pleospora paludiscirpi. La spécificité des amorces a été testée en utilisant la base de données BlastN du site du NCBI (GenBank). Par la suite, la spécificité des amorces a été testée sur des ADN de différentes espèces d'Alternaria (A. brassicae, A. radicina, A. japonica, A. infectoria, A. alternata, A. capsici, A. dauci, A. cucumerina, A. solani et A. brassicicola), 39 espèces de Phytophthora, trois espèces de Verticillium et deux espèces de Pythium. Seul l'ADN d'Alternaria solani a été amplifié (Figure 19).

Étendre la méthode de détection à d'autres pathogènes de la pomme de terre : Colletotrichum coccodes. Colletotrichum coccodes est l'agent pathogène responsable de la dartrose de la pomme de terre. Les symptômes de dartrose apparaissent principalement sur le tubercule, les racines et sur la base des plants. La maladie peut également progresser sur le feuillage. Au printemps, les acervules de C. coccodes

produisent les spores qui sont dispersées par le vent, la pluie et en moindre mesure, par l'irrigation. La maladie est polycyclique, ce qui augmente le risque d'infections en saison. Notre objectif pour la saison 2012 était de valider la possibilité de capturer et d'identifier les spores de *C. coccodes* par microscopie. Les bâtonnets collectés tout au long de la saison ont été recomptés en fin de saison, spécifiquement pour *C. coccodes*.

En 2012, aucune spore de *C. coccodes* n'a pu être observée avec certitude au microscope et après confirmation auprès du laboratoire de diagnostique en

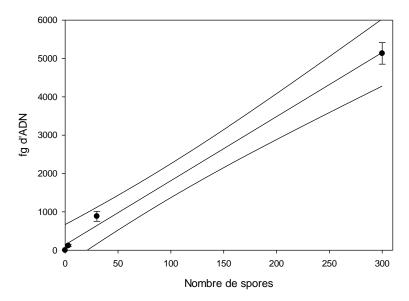


**Figure 20 :** Spores observées au microscope. Spores prétendues de *C. coccodes* à gauche et spores confirmées de *C. coccodes* au centre et à droite (spores de *C. coccodes* proposées par le Michigan State University) (sources : Gérard Gilbert, laboratoire de diagnostique).

phytoprotection du MAPAQ, les spores observées au microscope avaient davantage l'apparence des spores de *C. acutatum*, agent pathogène de l'anthracnose (Gérard Gilbert, communication personnelle).

Il semble que l'identification des spores de *C. coccodes* par microscopie présente des difficultés. Les récents développements en biologie moléculaire pourraient permettre de pallier cette contrainte. En 2002, l'équipe du Dr. Cullen a développé un test en PCR quantitatif basé sur les séquences ITS, permettant l'identification spécifique de *C. coccodes*. Ces séquences ITS ont comme caractéristique d'être présentes en plusieurs copies, ce qui permet d'augmenter considérablement la sensibilité d'un tel test. En 2013, nous avons évalué cette méthode afin de détecter la présence de l'agent

pathogène sur les bâtonnets. Cependant, aucun symptôme de dartrose n'a pu être récupéré dans les sites suivis dans la région de Québec ou en Montérégie-Ouest. Finalement, nous avons pu obtenir des plants infectés provenant de Florenceville au Nouveau-Brunswick. L'ADN de *C. coccodes* a été extrait des symptômes et nous avons adapté le test publié pour qu'il fonctionne à l'aide de notre protocole d'extraction. Nous avons amplifié avec succès un fragment de 145 pb tel qu'attendu. Nous avons également pu confirmer que la sensibilité du test était de 3 spores par bâtonnet (Figure 21). Par la suite, les bâtonnets de 2012 et 2013 ont été analysés au qPCR. Malheureusement, aucun des bâtonnets analysés n'a été contrôlé positif pour *C. coccodes*.



**Figure 21 :** Relation entre la quantité d'ADN et le nombre de spores de *C. coccodes*.

**Tableau 4 :** Diffusion des résultats.

Activités prévues de l'ANNEXE A	Activités réalisées	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au PCAA (logo, mention)
Colloque Présentation	Présentation sommaire des objectifs du projet Présentation des objectifs et résultats préliminaires	Colloque sur la pomme de terre Rencontre RAP pomme de terre	Novembre 2010 Mars 2011	250 personnes 40 personnes	Logo + mention  Logo + mention
Article dans les journaux (les nommer) Article dans revues spécialisées Article dans revues régionales Article scientifique	Publication d'un reportage dans une revue spécialisée	Spud Smart  http://www.spudsmart .com/previous- issues/191- fall2011inthefield.htm	Décembre 2011	Auditoire d'environ 3000 producteurs et spécialistes	Mention

Activités prévues de l'ANNEXE A	Activités réalisées	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au PCAA (logo, mention)
Feuillet, brochure					
Colloque Présentation Conférence Forum Stand	Présentation	Dupont France, Colmar; Dupont Canada, CRAW	Décembre 2012	10 chercheurs, techniciens et directeurs scientifiques	Logo et mention
Conférence de presse	Présentation d'affiche à un congrès scientifique	Congrès annuel du PAA  (Association américaine des producteurs de pommes de terre)	Juillet 2013	250 chercheurs, producteurs et technologues	Logo et mention

Activités prévues de l'ANNEXE A	Activités réalisées	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au PCAA (logo, mention)
Autres	Présentation d'affiche à un congrès scientifique	Premier congrès international sur les écosystèmes fragiles	Décembre 2013	250 chercheurs et technologues	Logo et mention

## 1. CONCLUSIONS

Ce projet de recherche nous a permis d'améliorer les connaissances quant à l'aérobiologie des maladies aérotransportées de la pomme de terre. Ce projet a permis entre autre de déterminé l'efficacité des capteurs de spores pour le suivi des concentrations aérienne de la pomme de terre, plus particulièrement de *Phytophthora infestans*, d'*Alternaria solani* et *Colletotrichum coccodes*. Les connaissances acquises sur l'aérobiologie des maladies de la pomme de terre permettront une meilleure estimation du risque en saison ainsi qu'une plus adéquate sélection des moments d'applications.

Ainsi, la diffusion de ces résultats permettra une prise de conscience par les producteurs et conseillers sur l'importance d'intégrer les concentrations aériennes de spores dans la gestion des maladies de la pomme de terre. À moyen et long terme, le suivi des concentrations aériennes de spores pourrait :

- Permettre d'identifier la source de l'inoculum initial;
- Permettre un meilleur contrôle du mildiou de la pomme de terre et de la brûlure hâtive;
- Réduire le recours aux applications de fongicides
- Bonifier les systèmes de modélisations

...Bien que le mildiou de la pomme de terre soit une maladie dévastatrice lorsqu'elle est présente, sa récurrence demeure assez limitée. Bien que les sources d'infection puissent être locale (jardins potager, plants volontaires, tas de rebus) la plus importante source d'inoculum serait d'origine exogène. Ces sporanges peuvent en effet parcourir de grandes distances et leur progression peut être suivi au fur et a mesure que des symptômes sont rapportés du sud des États-Unis vers le nord (http://usablight.org/map). Ainsi, pour le mildiou de la pomme de terre, il serait intéressant au Québec de détenir un réseau de surveillance sentinelle qui permettrait de prévenir l'arrivée des sporanges. Ces sentinelles devraient être installé chaque année aux mêmes endroits et ces emplacements sélectionner en fonction de la zone de production et des vents dominants. Les résultats régionaux provenant de ces

sentinelles pourraient être utilisés dans le cadre par exemple, du réseau d'avertissement phytosanitaire. De plus, l'utilisation des capteurs de spores devrait être combiné à l'utilisation d'un modèle prévisionnel, que ce soit pour améliorer la prévision du risque ou pour améliorer le modèle lui-même.

Pour ce qui est d'*Alternaria sp.*, le suivi des concentrations aériennes de spores pourraient être utilisé pour la prise de décision au quotidien, et les producteurs ou groupes de producteurs désireux d'utiliser cette approche, pourront bénéficier de l'expertise de Phytodata pour l'implantation d'un service de surveillance.

La pérennité du projet sera assurée notamment par la collaboration avec Patates Dolbec. Ce projet a également permis de consolider l'utilisation des capteurs de spores en Montérégie-Ouest et développé de nouveau partenariat notamment avec le CRAW, Agrinova ainsi qu'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Ces nouvelles collaborations permettront également d'assurer la pérennité du projet.

En 2014, PRISME proposera l'implantation d'un réseau de sentinelle en Montérégie-Ouest et offrira un service de suivi des concentrations aériennes de spores. PRISME disposera d'une aide financière de la direction régional du MAPAQ sous forme de subvention directes pour la promotion et favoriser l'adoption de l'utilisation de cette approche par les producteurs (Prime vert Volet 3.1).

## 2. SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET

Plusieurs maladies fongiques sont très dommageables pour la culture de la pomme de terre et bien que plusieurs modèles prévisionnels soient disponibles ou à l'essai, très peu sont utilisés efficacement par les producteurs ou professionnels du secteur de la pomme de terre au Québec. De plus, aucun des ces systèmes utilisés n'intègre à l'heure actuelle la présence ou l'abondance de l'agent infectieux en cause. À ce jour, la prise de décision quant à la protection de la culture repose principalement sur les activités de dépistage : cette approche est extrêmement utile pour comparer l'efficacité des interventions fongicides, mais ne permet jamais de prévoir l'infection. De plus, les symptômes sur le feuillage ne sont observés par les dépisteurs que 5 à 10 jours après

l'infection, ce qui entraîne un retard dans l'application des fongicides par rapport aux besoins de protection réels de la culture.

L'objectif général consistait à améliorer le contrôle des maladies fongiques de la pomme de terre (*Solanumtuberosum*) en fournissant aux producteurs des outils de détection précoce plus performants et précis que les systèmes de dépistage et de prévisions traditionnels.

De 2010 à 2013, 6 sites d'essais ont été implantés chaque année. Dans chacun des site d'essai, les concentrations aériennes de spores de *P. infestans*, *Alternaria sp.* et *Colletotrichum coccodes* ont été mesurés. Le lien entre les concentrations aériennes de spores et le développement des symptômes sur le feuillage des plants de pomme de terre a été établi, en conditions expérimentales ou commerciales. Ce projet est le produit d'une collaboration entre Phytodata Inc., Patates Dolbec Inc. et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Ce projet nous a permis d'améliorer nos connaissances de l'aérobiologie des pathogènes aérien de la pomme de terre. Le projet nous a permis d'évaluer le potentiel des capteurs de spores pour réaliser le suivi en saison de trois pathogènes importants de la pomme de terre : *Phytophthora infestans*, *Alternaria solani* et *Colletotrichum coccodes*. Concernant le mildiou de la pomme de terre, nous avons démontré en conditions contrôlées qu'il y avait une relation entre la concentration aérienne de sporanges de *P. infestans* et le développement des symptômes sur le feuillage. Au champ, il n'a pas été possible de valider cette relation car aucun symptôme de mildiou n'a été observé dans nos sites d'essais.

Dans le cadre de ce projet, nous avons pu démontrer en conditions contrôlées qu'il existe une corrélation exponentielle entre les CAS de *P. infestans* et le développement des symptômes sur le feuillage. Nous avons également démontré en conditions commerciales qu'il y avait une relation significative positive 5 jours plus tard.

En 2014, PRISME proposera l'implantation d'un réseau de sentinelle en Montérégie-Ouest et offrira un service de suivi des concentrations aériennes de spores. PRISME disposera d'une aide financière de la direction régional du MAPAQ sous forme de subvention directes pour la promotion et favoriser l'adoption de l'utilisation de cette approche par les producteurs (Prime vert Volet 3.1).