



IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA CONTAMINATION DE L'EAU DE RUISSELLEMENT PAR LES PESTICIDES



ÉTUDE DE CAS POUR HUIT COMBINAISONS
CULTURES ENNEMIS DURANT LA PÉRIODE **1981-2040**

Impact des changements climatiques sur la contamination de l'eau de ruissellement par les pesticides : étude de cas pour huit combinaisons cultures ennemis durant la période 1981-2040.

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada,
représentée par le ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire, (2016)

No d'AAC 12493F

ISBN 978-0-660-04983-0

No de catalogue A59-40/2016F-PDF

Issued also in English under the title *Climate Change Impacts on Pesticide Contamination of Surface Runoff - Case Study of Eight Crop/Pest Combinations for the Period 1981-2040.*

Pour de plus amples renseignements, rendez-vous au www.agr.gc.ca
ou composez sans frais le 1-855-773-0241.

Impact des changements climatiques sur la contamination de l'eau de ruissellement par les pesticides

*Étude de cas pour huit combinaisons
cultures-ennemis durant la période 1981-2040*

Auteurs : Patrick Gagnon, AAC¹
Claudia Sheedy, AAC¹
Alain N. Rousseau, INRS-ETE²
Gaétan Bourgeois, AAC¹
Gérald Chouinard, IRDA³
Pierre Lafrance, INRS-ETE²

Collaborateurs : René Audet, AAC¹
Blaise Gauvin St-Denis, Ouranos
Anne Blondlot, Ouranos
Danielle Bernier, MAPAQ⁴
Pierre-Antoine Thériault, MAPAQ⁴
Marie-Hélène April, MAPAQ⁴
Isabelle Giroux, MDDELCC⁵
Jean-Thomas Denault, MDDELCC⁵
Julie Corriveau, MDDELCC⁵

Décembre 2015

¹ Agriculture et Agroalimentaire Canada

² Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement (Université du Québec)

³ Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

⁴ Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

⁵ Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

Sommaire

Les changements climatiques risquent d'avoir différents effets sur l'agriculture, positifs ou négatifs. Le réchauffement pourrait permettre de meilleurs rendements agricoles et l'implantation de certaines cultures dans de nouvelles régions. Cependant, il pourrait accroître le nombre de sécheresses, augmentant le stress chez les cultures. Les changements climatiques pourraient aussi provoquer une augmentation du nombre d'applications de pesticides, potentiellement causée par la migration vers les pôles de nouvelles espèces de mauvaises herbes, d'insectes ravageurs ou de maladies, et par l'augmentation de l'occurrence et de l'abondance des espèces déjà problématiques. Avec l'augmentation probable de la fréquence et de l'intensité des événements pluvieux sur plusieurs régions au Canada, il appert que les pertes de pesticides par ruissellement de surface pourraient augmenter et potentiellement représenter une menace pour la qualité de l'eau.

L'objectif de ce projet est d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la contamination de l'eau par les pesticides agricoles durant la période 1981-2040 pour les cultures et ennemis suivants : mauvaises herbes dans les cultures de maïs (*Zea mays*), de soya (*Glycine max*) et de blé (*Triticum aestivum*) ainsi que trois insectes (charançon de la prune (*Conotrachelus nenuphar*), mouche de la pomme (*Rhagoletis pomonella*), carpocapse de la pomme (*Cydia pomonella*)) et deux maladies (feu bactérien (*Erwinia amylovora*), tavelure du pommier (*Venturia inaequalis*)) touchant le pommier (*Malus pumila*). Les données de 23 simulations climatiques ont été utilisées sur 28 sites (champs ou vergers) québécois, et l'impact du climat sur les cultures et leurs ennemis a été évalué à partir de modèles du Centre informatique de prévision des ravageurs en agriculture (CIPRA), logiciel bioclimatique développé par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). Au total, 21 ingrédients actifs ont été considérés. Le transport des pesticides dans le sol et dans l'eau de ruissellement de surface a été simulé par le modèle PRZM (*Pesticide Root Zone Model*) version 3.12.3, et une approche stochastique a été utilisée pour tenir compte de l'incertitude associée aux paramètres du modèle de transport. L'évaluation a été faite pour certains ennemis seulement, puisque les interactions avec le climat et la culture sont spécifiques à chaque ennemi. À notre connaissance, ce projet est la première étude de cas canadienne évaluant l'impact des changements climatiques à la fois sur les applications de pesticides et sur les pertes par ruissellement de surface. La méthodologie élaborée tient compte de l'ensemble des sources d'incertitude et peut être adaptée pour d'autres cultures et ennemis. Ce projet s'inscrit dans un objectif plus global d'assurer la durabilité environnementale des activités agricoles.

Les résultats ont montré un impact significatif du réchauffement sur les dates d'application, qui seraient devancées en moyenne d'environ trois jours pour les applications en début de saison et d'environ huit jours pour les applications plus tard en saison entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040. L'impact des changements climatiques sur les pertes de pesticides par ruissellement de surface est cependant moins clair. La plus forte augmentation de ces pertes a été simulée pour les ingrédients actifs utilisés contre la tavelure du pommier (de l'ordre de 10 % en moyenne sur une période de 30 ans), mais cette augmentation est statistiquement non significative. La principale raison de ce faible impact est l'incertitude associée à l'évolution des événements de pluie intense. Les résultats ont montré que la plus grande partie de la charge totale de pesticides transportée sur 60 ans provenait de seulement quelques événements de pluie intense survenant peu de temps après une application. Or, la variabilité naturelle de la pluie journalière maximale durant la fenêtre d'application est grande. Bien que la majorité des simulations climatiques utilisées présentent des tendances à la hausse pour la pluie journalière maximale durant la fenêtre d'application, le nombre de tendances à la baisse est considérable et une faible proportion des tendances à la hausse est statistiquement significative.

Les résultats obtenus sont spécifiques aux cultures, aux ennemis, aux régions et à la période (1981-2040) étudiés. Néanmoins, certains constats généraux peuvent être tirés de ce projet. Les résultats confirment l'impact majeur de l'intensité des événements de pluie suivant une application et du délai entre l'application et ces événements sur la perte de pesticides par ruissellement de surface. Ce constat est vrai sur tous les sites et pour toutes les combinaisons cultures-ennemis analysées. Le délai entre l'application et la pluie est particulièrement important pour les ingrédients actifs se dégradant rapidement. La disponibilité d'outils d'aide à la décision destinés aux producteurs, tels les modèles météorologiques prévisionnels couplés avec des modèles bioclimatiques, peut s'avérer un bon moyen de limiter les pertes. Dans la mesure où cela est possible, l'utilisation d'ingrédients actifs moins persistants, moins mobiles, moins toxiques et pouvant être incorporés directement dans le sol devrait être privilégiée. L'application de pratiques de gestion réduisant le ruissellement de surface et l'érosion devrait aussi être envisagée. Cependant, même si elles réduisent le ruissellement, des pratiques comme le travail réduit du sol et le semis direct ne sont pas nécessairement bénéfiques sur le plan des pertes de pesticides, car elles nécessitent plus d'applications de pesticides. En fait, l'impact de ces mesures pourrait varier d'un champ à l'autre. Des études plus poussées devraient être menées sur le terrain afin de mieux évaluer cet impact.

Les constats mentionnés ci-haut sont valides, que l'on soit dans un contexte de changements climatiques ou non. La mise en place des mesures suggérées dépend des

outils disponibles pour le producteur (p. ex., ingrédients actifs, modèles prévisionnels, personnes-ressources) et de leur viabilité économique pour le producteur.

Table des matières

Sommaire	ii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux.....	x
1 Contexte	1
2 Objectifs.....	3
3 Revue de littérature	5
3.1 Impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures	5
3.1.1 Mauvaises herbes	5
3.1.2 Insectes ravageurs	6
3.1.3 Maladies.....	7
3.2 Impact des changements climatiques sur le transport des produits phytosanitaires .	8
3.3 Synthèse	10
4 Méthodologie et données	12
4.1 Simulations climatiques.....	12
4.2 Scénarios de pratiques agricoles.....	14
4.2.1 Scénarios de semis, de récolte et de travail du sol.....	14
4.2.2 Scénarios d'application des pesticides.....	16
4.2.3 Mesures d'adaptation.....	19
4.3 Sites étudiés	20
4.4 Modèle de transport des pesticides dans l'eau.....	21
4.5 Modèle stochastique.....	22
4.6 Variables pertinentes retenues	23

4.6.1. Variables-réponses	23
4.6.2 Variables climatiques influentes	24
5 Résultats	26
5.1 Évolution des variables climatiques.....	26
5.1.1 Dates d’application pour les herbicides et les insecticides	26
5.1.2 Nombre d’applications de fongicides et de bactéricides.....	30
5.1.3 Pluie journalière maximale	32
5.1.4 Pluie journalière moyenne	34
5.2 Contamination de l’eau de ruissellement par les pesticides.....	36
5.2.1. Évolution de la charge annuelle transportée sous forme dissoute	36
5.2.2 Évolution de la charge transportée sous forme adsorbée.....	40
5.2.3 Perte relative moyenne par ingrédient actif	41
5.2.4 Concentration moyenne dans l’eau par ingrédient actif	41
5.3 Impact des mesures d’adaptation	43
5.3.1 Non-application la veille d’une pluie.....	44
5.3.2 Variation du seuil de pluie	46
5.3.3 Travail réduit du sol.....	47
5.3.4 Semis direct.....	49
5.3.5 Incorporation dans le sol	50
6 Conclusion	53
6.1 Résumé des constats	53
6.1.1 Évolution des variables climatiques pertinentes	53
6.1.2 Évolution des charges transportées	54
6.1.3 Impact des mesures d’adaptation	55

6.2 Limitations	55
6.3 Recommandations.....	58
Références.....	59
Annexes.....	70
Annexe A. Propriétés chimiques des ingrédients actifs.....	71
Annexe B. Risque d'infection par la tavelure du pommier	74
Annexe C. Risque d'infection par le feu bactérien	76
Annexe D. Caractéristiques des sites	77
Annexe E. Paramètres du modèle PRZM	79
Annexe F. Valeurs pseudo-aléatoires utilisées par le modèle stochastique.....	87
Remerciements.....	92

Liste des figures

Figure 1. Sites à l'étude.	21
Figure 2. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour les dates de début et de fin de la fenêtre d'application d'herbicides.....	27
Figure 3. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour les dates d'application d'insecticides pour la pomme.....	28
Figure 4. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour le nombre de jours où les applications d'herbicides et d'insecticides sont possibles.....	29
Figure 5. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour le nombre d'applications de fongicides contre la tavelure du pommier.	30
Figure 6. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour le nombre d'applications de bactéricides contre le feu bactérien (pomme).....	31
Figure 7. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour la pluie journalière maximale durant les fenêtres d'application (a) mobiles et (b) fixes.....	34
Figure 8. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour la pluie journalière moyenne durant les fenêtres d'application (a) mobiles et (b) fixes.....	36
Figure 9. Proportion de tendances positives (%) pour la charge annuelle transportée sous forme dissoute obtenues pour chacun des 28 sites, 21 ingrédients actifs, 100 réalisations et 23 simulations climatiques.....	37
Figure 10. Différences entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 de la charge annuelle moyenne transportée sous forme dissoute pour deux combinaisons site/culture/ingrédient actif.	39
Figure 11. Proportion de tendances positives (%) pour la charge annuelle transportée sous forme adsorbée obtenues pour chacun des 28 sites, 21 ingrédients actifs, 100 réalisations et 23 simulations climatiques.....	40
Figure 12. Impacts de la mesure d'adaptation (non-application la veille d'une pluie) et des changements climatiques sur la charge de phosmet transportée sous forme dissoute	

dans l'eau de ruissellement évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les neuf sites simulés.	44
Figure 13. Charge totale (1981-2040) de phosmet transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement des simulations avec et sans adaptation pour les 20 700 combinaisons site/simulation climatique/réalisation.	45
Figure 14. Impacts de la mesure d'adaptation (abaissement du seuil de pluie de 1 à 0,1 mm) et des changements climatiques sur la charge de phosmet transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les neuf sites simulés.	46
Figure 15. Impacts de la mesure d'adaptation (élévation du seuil de pluie de 1 à 5 mm) et des changements climatiques sur la charge de phosmet transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les neuf sites simulés.	47
Figure 16. Impacts de la mesure d'adaptation (travail réduit du sol) et des changements climatiques sur la charge de glyphosate transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les dix sites simulés.	48
Figure 17. Impacts de la mesure d'adaptation (semis direct) et des changements climatiques sur la charge de glyphosate transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les dix sites simulés.	50
Figure 18. Impacts de la mesure d'adaptation (incorporation dans le sol) et des changements climatiques sur la charge d'atrazine transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les dix sites simulés. ..	51

Liste des tableaux

Tableau 1. Modèle global, modèle régional, méthode de mise à l'échelle statistique et scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES; Nakicenovic et Swart, 2000) pour les 23 simulations utilisées.	13
Tableau 2. Définition des dates de semis, d'émergence, de maturité, de récolte et de travail du sol pour les quatre cultures considérées pour une année donnée.....	15
Tableau 3. Herbicides considérés et leur fenêtre d'application.	17
Tableau 4. Insecticides considérés et leurs fenêtres d'application (pomme seulement)...	18
Tableau 5. Fongicides considérés pour contrer la tavelure du pommier.	19
Tableau 6. Mesures d'adaptation simulées.	20
Tableau 7. Résultats du test de Mann-Kendall appliqué sur la pluie journalière maximale durant la fenêtre mobile pour la période 1981-2040 pour chaque combinaison culture/site/simulation climatique.....	32
Tableau 8. Résultats du test de Mann-Kendall appliqué sur la pluie journalière maximale durant la fenêtre d'application fixe pour la période 1981-2040 pour chaque combinaison culture/site/simulation climatique.....	33
Tableau 9. Résultats du test de Mann-Kendall appliqué sur la pluie journalière moyenne durant la fenêtre d'application mobile pour la période 1981-2040 pour chaque combinaison culture/site/simulation climatique.	35
Tableau 10. Résultats du test de Mann-Kendall appliqué sur la pluie journalière moyenne durant la fenêtre d'application fixe pour la période 1981-2040 pour chaque combinaison culture/site/simulation climatique.....	35
Tableau 11. Coefficient de corrélation de Pearson (%) entre la proportion de tendances positives par réalisation et la valeur pseudo-aléatoire servant à générer chaque paramètre (Annexe F).	38
Tableau 12. Proportion moyenne de la masse appliquée transportée dans l'eau de ruissellement sous formes dissoute et adsorbée par ingrédient actif.	41
Tableau 13. Moyenne des concentrations moyennes annuelles et maximales annuelles journalières pour chaque ingrédient actif dans l'eau de ruissellement (somme des formes dissoute et adsorbée).....	41

Tableau 14. Propriétés chimiques des ingrédients actifs utilisés.....	71
Tableau 15. Nombre de feuilles (somme des pousses de bouquets et des pousses végétatives) en fonction de la température (basé sur Carisse et Jobin, 2006).	74
Tableau 16. Nombre d'heures de mouillure requis pour qu'il y ait risque d'infection en fonction de la température moyenne durant les heures de mouillure (basé sur Stensvand <i>et al.</i> , 1997; et Carisse et Jobin, 2006).....	74
Tableau 17. Valeur de risque (<i>risk value</i>) d'infection par le feu bactérien pour une journée donnée en fonction de sa température maximale.....	76
Tableau 18. Caractéristiques des sites étudiés.....	77
Tableau 19. Définition des paramètres les plus importants du modèle PRZM avec leur distribution statistique sélectionnée.....	79
Tableau 20. Valeurs pseudo-aléatoires u suivant la distribution uniforme (0,1) utilisées pour la sélection des valeurs de paramètres pour chaque réalisation.....	87

1 Contexte

Les décisions liées aux pratiques agricoles dépendent fortement des conditions climatiques, de la demande dictée par les marchés locaux et internationaux (*i. e.*, l'économie) ainsi que des politiques et programmes gouvernementaux. Ces dépendances se reflètent notamment dans le choix des cultivars, des dates de semis et de récolte, et dans la présence ou non de certains ennemis des cultures, régissant les applications de pesticides.

La communauté scientifique s'entend maintenant pour dire que l'homme a un impact dominant sur l'augmentation récente des températures, par l'entremise de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – GIEC, 2013). Pour le futur, bien qu'il soit déjà admis que la température globale moyenne continuera à augmenter même selon des scénarios optimistes (GIEC, 2013), il est difficile de déterminer les impacts des changements climatiques, puisqu'ils dépendent des décisions politiques et économiques des années à venir et qu'ils peuvent varier d'une région à l'autre.

Face à ce climat changeant, les pratiques agricoles devront possiblement être adaptées, sans quoi leur durabilité pourrait être compromise. Les changements climatiques peuvent avoir différents effets sur les pratiques agricoles. Alors que le réchauffement climatique devrait permettre de meilleures conditions de croissance dans les régions tempérées, entraînant une meilleure productivité pour les cultures actuelles et possiblement l'implantation de nouvelles cultures, les ennemis des cultures pourraient aussi en profiter (Hakala *et al.*, 2011). Ce rapport se concentre sur la prédiction de l'impact des changements climatiques sur la contamination de l'eau de ruissellement par les produits phytosanitaires. La contamination de l'eau dépend : (i) de l'utilisation des produits phytosanitaires (choix des produits, quantités, fréquences d'application) et (ii) de leur transport et leur devenir sur le couvert végétal, dans le sol et dans l'eau. Ces deux facteurs dépendent particulièrement du climat, mais aussi notamment du délai entre l'application et la pluie, de l'indice foliaire du couvert, des propriétés du sol, de la pente du terrain ainsi que de la mobilité et de la persistance du produit. Ces facteurs font intervenir de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques ayant des interactions parfois complexes. Il en résulte que l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la contamination de l'eau de ruissellement par les produits phytosanitaires nécessite l'élaboration d'une méthodologie robuste tenant compte des différentes sources d'incertitude.

La littérature scientifique compte très peu d'études qui traitent à la fois de l'impact des changements climatiques sur des ennemis des cultures et sur le transport des produits

phytosanitaires vers les eaux de surface (p. ex., Koleva et Schneider, 2010; Kattwinkel *et al.*, 2011). À notre connaissance, aucune étude de cas n'a été réalisée au Québec ou au Canada.

2 Objectifs

L'objectif général du projet est de prédire l'impact des changements climatiques sur l'évolution de la contamination de l'eau de ruissellement de surface par les produits phytosanitaires pour la période 1981-2040, pour les cultures et ennemis suivants :

- Maïs grain ou ensilage (*Zea mays*), soya (*Glycine max*) et blé (*Triticum aestivum*) : mauvaises herbes;

- Pommier (*Malus pumila*) : trois insectes (charançon de la prune (*Conotrachelus nenuphar*), mouche de la pomme (*Rhagoletis pomonella*), carpocapse de la pomme (*Cydia pomonella*)) et deux maladies (feu bactérien (*Erwinia amylovora*), tavelure du pommier (*Venturia inaequalis*)).

Les trois objectifs spécifiques sont les suivants :

- (i) Élaborer une méthodologie intégrant les interactions entre le climat, la phénologie des cultures et des ennemis, les applications de pesticides et les processus chimiques et physiques liés au transport et au devenir des pesticides dans l'eau de ruissellement, ainsi que les différentes sources d'incertitude associées à chacune de ces composantes.
- (ii) Estimer de manière objective (statistique) l'impact des changements climatiques sur l'évolution de la contamination de l'eau de ruissellement de surface par les produits phytosanitaires pour la période 1981-2040, pour les combinaisons culture-ennemis sélectionnées à l'échelle du champ ou du verger.
- (iii) Estimer de manière objective l'impact de mesures d'adaptation visant à atténuer la contamination de l'eau de ruissellement de surface par les produits phytosanitaires.

Dans une optique plus large, ce projet a pour but d'aider à assurer la durabilité des activités agricoles.

L'étude se concentre sur quelques cultures et ennemis seulement, puisque chaque ennemi a son propre comportement par rapport à son hôte et aux variations du climat (Bloomfield *et al.*, 2006). Les cultures et ennemis choisis sont tous présents sur le territoire agricole québécois à l'heure actuelle et leur phénologie est modélisée par le Centre informatique de prévision des ravageurs en agriculture (CIPRA; Plouffe *et al.*, 2014), logiciel bioclimatique développé par Agriculture et Agro-alimentaire Canada (AAC). La méthodologie élaborée dans le cadre de l'étude peut être reprise pour d'autres ennemis et cultures.

L'évaluation prédictive de la contamination de l'eau de ruissellement a été faite à l'aide du modèle de transport des pesticides PRZM (Suarez, 2005), en considérant les pesticides dissous (directement dans l'eau de ruissellement) et adsorbés (sur le sol érodé par l'eau). Des travaux antérieurs de simulation du transport des pesticides ou de quantification *in situ* sur champs agricoles ont montré que la contamination des eaux souterraines était négligeable par rapport à la contamination des eaux de surface (Lafrance *et al.*, 1997; Cessna *et al.*, 2010; Gagnon *et al.*, 2014). En théorie, la contamination de l'eau souterraine pourrait être non négligeable s'il y avait écoulement préférentiel (Bloomfield *et al.*, 2006). Ce type d'écoulement n'est pas inclus dans tous les modèles hydrologiques. Il a cependant été démontré que l'écoulement préférentiel pouvait jouer un rôle important dans le transport de contaminants vers les drains souterrains (Poirier *et al.*, 2012) et que son impact pouvait être modifié dans un contexte de changements climatiques (Bloomfield *et al.*, 2006). Cela étant dit, la contamination de l'eau souterraine n'a pas été considérée dans le présent projet.

L'estimation des paramètres du modèle PRZM a été faite selon une approche stochastique afin de tenir compte des sources d'incertitude majeures. Étant donné l'incertitude concernant l'évolution de certaines pratiques agricoles, notamment le choix des cultures, les aires cultivées, le travail du sol et les ingrédients actifs disponibles, l'évolution de la contamination au-delà de l'année 2040 n'a pas été analysée.

Les résultats obtenus dans ce projet représentent la contamination *in situ* (au champ) et non la contamination en rivière ou à l'échelle d'un bassin versant. Ces estimations locales sont importantes pour l'évaluation de l'impact sur les sous-bassins de tête (Luo *et al.*, 2011). Les sites agricoles retenus sont tous situés au Québec, car les données climatiques disponibles pour la période analysée (1981-2040) ne couvraient que le territoire québécois.

3 Revue de littérature

Cette revue de littérature se concentre sur l'impact des changements climatiques sur la contamination de l'eau de ruissellement par les produits phytosanitaires. L'impact des changements climatiques est présenté en deux volets. D'abord, il y a l'impact sur les ennemis des cultures considérés, qui aura une incidence directe sur l'évolution des applications de pesticides. Ensuite, il y a l'impact sur le transport des pesticides dans l'eau de ruissellement.

3.1 Impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures

Bien qu'on s'attende à ce que la prévalence de la plupart des mauvaises herbes, insectes ravageurs et maladies nuisibles augmente (Bloomfield *et al.*, 2006; Hakala *et al.*, 2011), l'évaluation de l'impact des changements climatiques doit se faire spécifiquement pour chaque ennemi des cultures. Cette évaluation est difficile à réaliser, notamment parce que les interactions entre l'ennemi et la culture sont complexes et qu'il est difficile de déterminer comment les changements climatiques vont réellement les influencer.

3.1.1 Mauvaises herbes

Pour les mauvaises herbes, l'impact peut être positif ou négatif, selon le type d'espèce (C₃ ou C₄) et l'interaction avec la culture (Stratonovitch *et al.*, 2012). Les espèces envahissantes résistant à des températures élevées risquent d'être encore plus nuisibles dans l'avenir (Tungate *et al.*, 2007). Certaines de ces espèces, actuellement présentes uniquement dans les régions plus chaudes de l'Amérique du Nord, pourraient migrer vers le nord (Wolfe *et al.*, 2008). En plus de l'augmentation de la température, les changements climatiques auront une incidence sur d'autres variables qui pourront avoir un effet déterminant sur la croissance de la mauvaise herbe et de la culture. Par exemple, une augmentation des situations de stress hydrique pourrait diminuer la présence d'une mauvaise herbe, surtout de type C₃ (Stratonovitch *et al.*, 2012). Aussi, l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'air aura pour effet de favoriser la croissance des cultures de type C₃ (ex. : blé, soya), mais aussi des mauvaises herbes du même type. Grâce à la diversité génétique des mauvaises herbes, une augmentation de la concentration de CO₂ pourrait avantager les mauvaises herbes par rapport aux cultures (Wolfe *et al.*, 2008). Ceci étant dit, l'effet net de l'augmentation de la concentration de CO₂ sur le rendement dépend de l'interaction entre la culture et la mauvaise herbe ainsi que des projections futures. Par exemple, Stratonovitch *et al.* (2012) ont montré que le blé d'hiver était avantagé par rapport à la mauvaise herbe *Alopecurus myosuroides* selon des projections d'augmentations de la température et de la concentration de CO₂ pour le Royaume-Uni. Ziska (2010, 2013) a montré que le rendement du soya sans mauvaise herbe avec des

concentrations de CO₂ ambiantes était comparable au rendement obtenu lorsque ce dernier était en compétition avec le *Cirsium arvense* (Ziska, 2010) et le *Abutilon theophrasti* (Ziska, 2013) avec des concentrations de CO₂ respectivement de 300 et 250 parties par million (ppm) supérieures aux conditions ambiantes. La concentration de CO₂ n'a cependant pas d'impact observable sur la date de floraison (Ziska, 2010, 2013). Une culture de type C₄ comme le maïs devrait bénéficier de l'augmentation de la température, mais très peu de l'augmentation de la concentration de CO₂ (Bootsma *et al.*, 2005). La compétitivité du maïs par rapport aux mauvaises herbes de type C₃ devrait donc diminuer (Diós *et al.*, 2010).

Lorsque la concentration de CO₂ augmente, le glyphosate (*N*-(phosphonométhyl)glycine), herbicide non sélectif très répandu utilisé surtout en présemis pour les champs en travail réduit ou pour les cultures transgéniques lui résistant, perd de son efficacité (Bloomfield *et al.*, 2006; Wolfe *et al.*, 2008; Ziska, 2010). Il est cependant difficile d'évaluer s'il sera nécessaire en pratique d'augmenter le nombre d'applications d'herbicide afin de protéger les rendements des cultures sans une analyse plus globale regroupant les conditions au champ, à savoir la prise en compte de plusieurs espèces de mauvaises herbes simultanément, avec différentes valeurs de concentration de CO₂ et de taux d'humidité (Ziska, 2013).

3.1.2 Insectes ravageurs

Les insectes ravageurs sont poïkilothermes, ce qui signifie que leur aire de distribution, leur densité de population et leur nombre de générations par saison dépendent directement de la température (Rafoss et Saethre, 2003; Bloomfield *et al.*, 2006; Hirschi *et al.*, 2012; Gagnon *et al.*, 2013). Une augmentation de la température devrait donc augmenter la menace pour la culture. Il faut toutefois noter que cette menace dépend de la synchronisation entre le développement de la culture et du ravageur (Rafoss et Saethre, 2003; Luedeling *et al.*, 2011; Gagnon *et al.*, 2013). L'impact sur les insectes ravageurs de la concentration de CO₂ dans l'air et de la radiation UV-B est considéré comme négligeable par rapport à l'impact de la température (Luedeling *et al.*, 2011).

Parmi les trois insectes considérés dans ce projet, les études présentes dans la littérature scientifique portant sur l'impact des changements climatiques se sont principalement concentrées sur le carpocapse de la pomme. À partir de projections climatiques pour la période 2045-2074, Hirschi *et al.* (2012) estiment que le développement d'une troisième génération deviendra la norme pour cet insecte dans certaines régions de la Suisse, alors que la norme est plutôt de deux générations actuellement. Le premier vol serait devancé d'environ deux semaines et les phases de développement subséquentes seraient devancées d'environ trois semaines (Hirschi *et al.*, 2012). Luedeling *et al.* (2011) obtiennent aussi une augmentation d'une génération de 1950 à l'horizon 2070 à partir de

l'analyse de divers scénarios climatiques en Californie. Des analyses faites à partir de deux simulations climatiques selon le scénario optimiste d'émissions de gaz à effet de serre A1B (Nakicenovic et Swart, 2000) montrent qu'une troisième génération pourrait apparaître en Pologne, alors qu'il n'y en a que deux actuellement (Juszczak *et al.*, 2013). L'augmentation du nombre de générations pourrait être encore plus importante si la diapause, qui dépend du nombre d'heures d'ensoleillement, mais aussi de la température (Stoekli *et al.*, 2012), se produit plus tard. Bien que bénéfique pour le développement de l'insecte, l'augmentation de la température peut causer une augmentation du taux de mortalité en été. Il n'est cependant pas exclu que le carpocapse puisse s'adapter à des températures plus élevées (Rafoss et Saethre, 2003; Hirschi *et al.*, 2012). Chidawanyika et Terblanche (2011) ont par ailleurs montré que le taux de survie de cet insecte augmentait si la montée de la température vers une température létale de courte durée se faisait de manière plus graduelle.

3.1.3 Maladies

Comme c'est le cas pour les mauvaises herbes, l'impact des changements climatiques devrait varier d'une maladie à l'autre (Jones et Barbetti, 2012). De façon générale, l'augmentation du CO₂ risque d'être favorable au développement d'agents pathogènes (Gagnon *et al.*, 2013). Les modèles de prévision d'infections prenant en compte la température et la durée de mouillure des feuilles représentent un outil intéressant pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les maladies (Bourgeois *et al.*, 2004).

Afin d'estimer l'impact des changements climatiques sur la tavelure du pommier, Bourgeois *et al.* (2004) ont utilisé les sorties de cinq modèles de climat global. Les données climatiques ont été corrigées par rapport aux données observées sur un site expérimental à Saint-Jean-sur-Richelieu (Québec) et ramenées au pas de temps horaire. Ces données ont ensuite été utilisées en entrée pour des simulations bioclimatiques avec CIPRA. Les comparaisons entre quelques horizons futurs et la période de référence (1961-1990) montrent que les premières infections devraient se produire plus tôt et que les dernières infections devraient se produire à peu près au même moment que celles ayant cours actuellement. Il en résulte une augmentation moyenne du nombre d'infections pour le futur. Bien qu'ils ne l'aient pas considérée, Bourgeois *et al.* (2004) mentionnent que la caractérisation de l'augmentation de la température hivernale est essentielle pour quantifier l'impact des changements climatiques sur les cultures et leurs ennemis.

Pour ce qui est du feu bactérien, Hirschi *et al.* (2012) ont utilisé des données de projections climatiques pour la période 2045-2074 en entrée dans le modèle de prévision bioclimatique Maryblyt (Steiner, 1990; Steiner et Lightner, 1996; Duffy *et al.*, 2008). Alors que l'augmentation de la température leur avait donné une augmentation du

nombre de générations pour le carpocapse de la pomme, le signal est moins clair pour le feu bactérien. En fait, comme la période d'infection se produira plus tôt au printemps dans l'avenir, la température durant la période d'infection demeure sensiblement la même que dans le passé. De plus, le nombre d'heures de mouillure, estimé à partir du taux d'humidité et définissant les périodes d'infection, n'évolue pas significativement selon les projections utilisées (Hirschi *et al.*, 2012).

3.2 Impact des changements climatiques sur le transport des produits phytosanitaires

La proportion de la masse totale appliquée qui est transportée par l'eau de ruissellement du champ vers un cours d'eau est généralement inférieure à 1 % (Wauchope, 1978; Bloomfield *et al.*, 2006), mais peut atteindre jusqu'à 5 % dans certains cas (Burgoa et Wauchope, 1995). En Europe, la moyenne des pertes par ruissellement se situe autour de 0,8 % (Miao *et al.*, 2004). Pour les conditions agro-pédo-climatiques du Québec, une étude menée sur champs agricoles (Lafrance *et al.*, 1997) indique des pertes par ruissellement de surface pour les herbicides atrazine et métolachlore comprises entre 0,03 % et 2,0 % et entre 0,02 % et 2,6 %, respectivement, pour chacune des deux premières pluies suivant l'application. En comparaison, les pertes par drainage agricole dans les mêmes conditions étaient inférieures à seulement 0,01 %. Au Québec et pour les concentrations dans l'eau de surface, des échantillonnages réalisés par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (anciennement le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs) dans quatre rivières situées dans des zones de cultures intensives de maïs et de soya ont révélé la présence de certains pesticides presque systématiquement, parfois à des concentrations supérieures au critère pour la protection de la vie aquatique (effet chronique; Giroux et Pelletier, 2012). Les analyses sur 20 ans montrent une tendance à la baisse pour les concentrations de plusieurs pesticides, mais une tendance à la hausse pour les concentrations de glyphosate qui devrait se poursuivre au cours des prochaines années, compte tenu de l'augmentation des cultures génétiquement modifiées tolérantes au glyphosate (Giroux et Pelletier, 2012).

Les pertes par ruissellement se produisent lors des événements pluvieux. Elles peuvent aussi se produire lors de l'irrigation ou de la fonte de la neige, mais de manière plus marginale. Pour le futur, le ruissellement de surface estival moyen peut augmenter si la précipitation maximale journalière en période estivale augmente, et ce, même si la précipitation estivale moyenne diminue (Dayyani *et al.*, 2012). Hunsche *et al.* (2007) ont illustré l'importance du volume de pluie tombée et surtout de l'intensité de la pluie. Leurs analyses sur les feuilles de pommier montrent que pour une certaine hauteur de pluie tombée après une application de mancozèbe (complexe de zinc et de manganèse et de

l'acide éthylènebis (dithiocarbamique)), les pertes sur les feuilles augmentaient en fonction de l'intensité. La relation entre la proportion de la masse appliquée qui quitte la feuille et l'intensité de la pluie est approximativement linéaire lorsque l'intensité est faible, et approximativement logarithmique lorsque l'intensité est plus forte (Hunsche *et al.*, 2007). Les pertes sont plus importantes lorsque le délai entre l'application et la pluie est court (Lafrance *et al.*, 1996; Barette, 2006; Hunsche *et al.*, 2007; Nolan *et al.*, 2008).

La grande variabilité naturelle des événements extrêmes de précipitation rend difficile l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les précipitations et les débits extrêmes. Par exemple, pour l'estimation de l'évolution du débit de pointe estival en rivière, l'impact de l'évolution du territoire obtenu par Quilbé *et al.* (2008; extrapolation jusqu'à l'horizon 2025 de l'évolution du territoire de 1976 à 1995) et par Poelmans *et al.* (2011; augmentation variant de 30 à 55 % de la superficie urbaine) est plus important que l'impact des changements climatiques. Néanmoins, pour le sud du Québec, Mailhot *et al.* (2012) ont montré que les précipitations de période de retour 2, 5, 10 et 20 ans devraient augmenter peu importe la durée (de 6 à 120 heures) pour la période 2041-2070 par rapport à la période 1971-2000. Ils ont utilisé 15 simulations climatiques, dont quatre couvrant la période future 2041-2070, provenant du *North American Regional Climate Change Assessment Program* (NARCCAP; Mearns *et al.*, 2007). L'impact des changements climatiques diminue avec la durée de l'événement et l'incertitude augmente avec la période de retour.

Le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ, 2013) a produit des projections futures de crues et d'étiages pour 40 bassins versants du Québec méridional en couplant les sorties de modèles climatiques avec le modèle hydrologique HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001a; Fortin *et al.*, 2001b; Turcotte *et al.*, 2003). Afin de tenir compte de l'incertitude concernant le climat futur, 89 simulations climatiques, provenant du *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3* (CMIP3; Meehl *et al.*, 2007), du Modèle régional canadien du climat (MRCC; Caya et Laprise, 1999; de Elia et Côté, 2010; Paquin, 2010) et du NARCCAP, ont été utilisées. Une augmentation probable des débits journaliers maximaux de récurrence 2 et 20 ans évalués à l'été et à l'automne est prédite pour la période 2041-2070 par rapport à la période 1971-2000 pour le nord du territoire (aux alentours du Saguenay – Lac-St-Jean). Pour le sud du Québec, la variabilité est trop forte pour conclure qu'il y a un changement.

Foulon (2013) a analysé les séries de crues estivales journalières de 1961 à 2100 produites par 10 simulations du MRCC couplées avec le modèle hydrologique HYDROTEL sur deux bassins versants du sud du Québec (rivières Bécancour et Yamaska). Des tendances à la hausse ont été détectées (*i. e.*, le débit journalier maximal en période estivale devrait augmenter), mais il y a de l'incertitude; certaines simulations ont donné des tendances négatives, mais statistiquement non significatives.

En outre, les changements climatiques peuvent aussi avoir une incidence sur l'évolution des masses de pesticides disponibles entre l'application et le transport par l'eau de ruissellement. Des températures plus élevées pourraient accélérer la biodégradation (Bloomfield *et al.*, 2006; Shymko *et al.*, 2011; Balbus *et al.*, 2013). Cela aurait pour effet de diminuer les concentrations de pesticides, mais pourrait en revanche mener à une augmentation du nombre d'applications (Bloomfield *et al.*, 2006). Il faut noter cependant que la dégradation n'est pas nécessairement favorisée si les températures sont trop élevées (Shymko *et al.*, 2011). L'augmentation de la température pourrait aussi avoir pour effet d'augmenter les pertes par volatilisation (Bloomfield *et al.*, 2006; Balbus *et al.*, 2013).

En plus de la température, le contenu en eau du sol a également une incidence sur la biodégradation. La fonction qui pourrait permettre d'exprimer précisément l'effet de la température et du contenu en eau du sol sur la biodégradation n'est toutefois pas connue pour tous les pesticides (Shymko *et al.*, 2011).

Des périodes plus sèches auraient pour effet d'augmenter les concentrations de pesticides (Bloomfield *et al.*, 2006). Le CEHQ (2013) prédit des étiages généralement plus sévères (*i. e.*, débits plus faibles) et plus longs durant la période 2041-2070 par rapport à la période 1971-2000 pour tout le Québec méridional. Pour les rivières Yamaska et Bécancour, Foulon (2013) a obtenu des diminutions statistiquement significatives, pour la période 1961-2100, des débits d'étiages estivaux sur 7 et 30 jours pour 8 des 10 simulations du MRCC utilisées.

3.3 Synthèse

La littérature scientifique relève de nombreuses interactions possibles entre la phénologie des espèces (cultures et ennemis), les changements climatiques et les pesticides (fréquence d'application, dosage, transport et devenir). Cependant, peu de ces interactions sont bien comprises à l'heure actuelle. Les constats obtenus dans la littérature scientifique sont souvent spécifiques à une culture, un ennemi, une région ou un ingrédient actif.

L'état actuel des connaissances a eu une incidence sur l'objectif qui a été fixé pour ce projet. Étant donné la relation spécifique pour chaque combinaison culture-ennemi, le choix des cultures et de leurs ennemis a été fait en tenant compte de la connaissance de leur phénologie. Le choix de ne tenir compte que du ruissellement de surface sans égard à l'écoulement souterrain a aussi été basé en partie sur des études antérieures (Lafrance *et al.*, 1997; Cessna *et al.*, 2010; Gagnon *et al.*, 2014).

La méthodologie utilisée, qui est détaillée à la section suivante, tient compte directement de l'impact de la température sur la phénologie des cultures et de leurs ennemis, de

l'interaction entre la phénologie des cultures et les moments d'application d'herbicides, et des interactions entre la température, la pluie, la phénologie du pommier et les moments d'application de fongicides et de bactéricides. Aussi, pour tenir compte de la grande variabilité des événements de pluie et de l'incertitude sur le climat futur, 23 simulations climatiques ont été utilisées. Par contre, des interactions potentielles entre le climat (température, CO₂) et certains facteurs importants, comme le taux d'application des pesticides et le taux de dégradation des pesticides dans le sol, n'ont pu être considérées, étant donné qu'elles sont difficilement quantifiables.

4 Méthodologie et données

L'évaluation de l'évolution de la contamination de l'eau de ruissellement par les produits phytosanitaires comporte plusieurs sources d'incertitude, dont le climat futur, les décisions prises à la ferme et les nombreux processus naturels régissant le transport des pesticides dans l'eau. Lorsque l'incertitude est grande, on doit utiliser une approche probabiliste afin d'aider les décideurs à déterminer si des mesures d'adaptation sont nécessaires (Quilbé *et al.*, 2008).

Dans ce projet, un modèle déterministe de transport des pesticides a été couplé avec un modèle stochastique. Le modèle stochastique génère différents scénarios d'application de pesticides et différentes valeurs de paramètres du modèle déterministe. Ainsi, pour chaque cas étudié, plusieurs séries temporelles ont pu être générées, menant à une distribution de valeurs pour une variable d'intérêt. Cette approche, appelée méthode de Monte-Carlo, est de plus en plus utilisée pour simuler les transport de pesticides (*p. ex.*, Carbone *et al.*, 2002; Warren-Hicks *et al.*, 2002; Dubus et Janssen, 2003; Holt *et al.*, 2010; Kondo *et al.*, 2012; Wu et Liu, 2014).

Cette section détaille la méthodologie utilisée dans ce projet, à savoir les simulations climatiques utilisées, les scénarios de pratiques agricoles retenus (incluant les traitements phytosanitaires), les sites à l'étude, le modèle de transport utilisé, le modèle stochastique élaboré et les variables pertinentes retenues.

4.1 Simulations climatiques

Les précipitations et les températures minimales et maximales journalières utilisées dans ce projet proviennent de 23 simulations climatiques (Tableau 1). Les données ont été fournies par le Consortium Ouranos. Les simulations proviennent de trois modèles globaux et de trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) différents. Les scénarios d'émissions de GES sont des projections qui dépendent de l'évolution à partir de l'année 2000 des technologies industrielles et des décisions politiques et économiques (Nakicenovic et Swart, 2000). Parmi les trois scénarios retenus, A2 est le plus pessimiste (*i. e.*, plus grand réchauffement climatique en 2100) et B1, le plus optimiste. Pour la période avant 2000, les concentrations de GES suivent les concentrations observées; elles sont donc identiques pour toutes les simulations climatiques. Pour chaque scénario d'émissions de GES, cinq membres de la troisième génération du modèle couplé climatique global canadien (MCCG3; Flato *et al.*, 2000; Scinocca *et al.*, 2008) sont retenus. La différence entre les membres d'un même modèle se situe au niveau des conditions atmosphériques initiales. Les autres modèles globaux retenus sont le modèle

allemand ECHAM version 5 (Junglaus *et al.*, 2006) et le modèle australien Mk version 3.5 (Gordon *et al.*, 2002, 2010).

Tableau 1. Modèle global, modèle régional, méthode de mise à l'échelle statistique et scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES; Nakicenovic et Swart, 2000) pour les 23 simulations utilisées.

Modèle global	Modèle régional	Mise à l'échelle statistique	Scénarios GES
MCCG3 ¹ n° 4	MRCC version 4.2 (Caya et Laprise, 1999; Paquin, 2010); domaine AMNO	<i>Daily translation</i> (Mpelasoka et Chiew, 2009)	A2
MCCG3 n° 5			A2
ECHAM5 ² n° 1			A2
ECHAM5 n° 3			A2
MCCG3 n° 1	-		A1B
MCCG3 n° 2			A1B
MCCG3 n° 3			A1B
MCCG3 n° 4			A1B
MCCG3 n° 5			A1B
MCCG3 n° 1			A2
MCCG3 n° 2			A2
MCCG3 n° 3			A2
MCCG3 n° 4			A2
MCCG3 n° 5			A2
MCCG3 n° 1			B1
MCCG3 n° 2			B1
MCCG3 n° 3			B1
MCCG3 n° 4			B1
MCCG3 n° 5			B1
Mk3.5 ³ n° 1			A1B
Mk3.5 n° 1			A2
Mk3.5 n° 1			B1
ECHAM5 n° 4			A1B

¹MCCG version 3 (Flato *et al.*, 2000; Scinocca *et al.*, 2008)

²ECHAM version 5 (Junglaus *et al.*, 2006)

³Mk version 3.5 (Gordon *et al.*, 2002, 2010)

Quatre simulations sont générées par le MRCC version 4.2 (Caya et Laprise, 1999; Paquin, 2010). Contrairement aux modèles globaux qui simulent le climat sur tout le globe, le MRCC, comme tous les modèles régionaux, simule le climat sur un domaine. Pour les quatre simulations utilisées, ce domaine est centré sur l'Amérique du Nord. Cela permet au MRCC d'avoir une grille à résolution horizontale plus fine (environ 45 km) que celles des modèles globaux (typiquement > 100 km). Cependant, les modèles régionaux ont besoin de données externes définissant les conditions aux frontières du domaine. Pour les quatre simulations du MRCC utilisées, les conditions aux frontières proviennent de simulations des modèles globaux MCCG et ECHAM (Tableau 1).

Toutes les simulations couvrent la période 1961-2100, mais seule la période 1981-2040 est retenue pour le projet. Tel que mentionné à la Section 2, les pratiques phytosanitaires évoluant rapidement, il a été décidé de ne pas prédire au-delà de 30 ans dans l'avenir. À noter qu'au cours de la période 2001-2040, les scénarios A1B et A2 sont très comparables; les émissions de GES, en équivalent-CO₂, du scénario A1B sont même légèrement supérieures à celles du scénario A2 pour la période 2001-2020 (GIEC, 2007).

Les sorties brutes des modèles climatiques, couvrant plusieurs dizaines, voire quelques centaines de kilomètres, ne permettent pas une représentation des variations climatiques à fine échelle. Afin de mieux représenter le climat à l'échelle de la ferme, la méthode de mise à l'échelle statistique *daily translation* a été appliquée (Mpelasoka et Chiew, 2009) : soit X une valeur simulée brute donnée (précipitation ou température) et p , la proportion de toutes les valeurs simulées brutes à ce moment de l'année (+/- 15 jours juliens) durant la période de référence (1961-2000) qui sont inférieures ou égales à X . La valeur simulée corrigée est le fractile d'ordre p de la distribution des valeurs observées à ce moment de l'année durant la période de référence. Pour un site donné, les valeurs météorologiques observées proviennent du point de la grille météorologique à résolution de 0,1°C de Ressources naturelles Canada le plus près (Hutchinson *et al.*, 2009; Hopkinson *et al.*, 2011). La mise à l'échelle a été effectuée par Blaise Gauvin St-Denis (Consortium Ouranos).

4.2 Scénarios de pratiques agricoles

Cette sous-section détaille les pratiques agricoles considérées, c'est-à-dire les scénarios de semis, de récolte et de travail du sol, les scénarios d'application des pesticides ainsi que les mesures d'adaptation considérées. Afin de bien caractériser l'impact du climat, l'ensemble des pratiques agricoles sur un site donné demeurerait inchangé durant toute la période 1981-2040. Seules les pratiques directement liées au climat pouvaient changer dans le temps.

4.2.1 Scénarios de semis, de récolte et de travail du sol

Le Tableau 2 illustre les critères utilisés pour définir les dates de semis, de récolte et de travail du sol à chaque saison pour chacune des cultures. Ces dates dépendent du climat et varient d'année en année.

Tableau 2. Définition des dates de semis, d'émergence, de maturité, de récolte et de travail du sol pour les quatre cultures considérées au cours d'une année donnée.

Culture	Début de la saison de croissance (DSC; jour julien)	Début du calcul des degrés-jours (DJ; jour julien) ^a	Émergence	Maturité	Date de récolte (jour julien)	Fin de la saison de croissance (FSC; jour julien)	Date du travail du sol (jour julien)
Blé	$\min_{j \geq j^*+4} (TMMP5_j > 5,5 \text{ °C})^b$	DSC ^d à (DSC+7)	178 DJ0 ^e	1942 DJ0	(FSC ^f -14)	$\max_{j \geq j^*+4} (TMMP5_j > 5,5 \text{ °C})$	Date de récolte + 1
Soya			62 DJ10	1216 DJ10			
Maïs	$\min_{j \geq j^*+4} (TMM5_j > 12,8 \text{ °C})^c$		62 DJ10	1942 DJ10	à FSC	$\min_{j \geq 213} (T \min_j \leq 2 \text{ °C})^g$	
Pomme^h	60		79 DJ5	1500 DJ5			

^a Pour le blé, le soya et le maïs, le début du calcul des degrés-jours (DJ) correspond à la date de semis.

$${}^b TMMP5_j = \frac{Tmoy_{j-4} + 4Tmoy_{j-3} + 6Tmoy_{j-2} + 4Tmoy_{j-1} + Tmoy_j}{16} \text{ (Atlas agroclimatique du Québec, 2012), } j^* = \text{jour julien du dernier gel printanier,}$$

$Tmoy_j$ = température moyenne au jour j .

$${}^c TMM5_j = \frac{Tmoy_{j-4} + Tmoy_{j-3} + Tmoy_{j-2} + Tmoy_{j-1} + Tmoy_j}{5} \text{ (Atlas agroclimatique du Québec, 2012), } j^* = \text{jour julien du dernier gel printanier.}$$

^d DSC = Début de la saison de croissance.

^e DJ x = degrés-jours base x °C calculés selon la méthode sinus simple (Baskerville et Emin, 1969).

^f FSC = Fin de la saison de croissance.

^g $T \min_j$ = température minimale au jour j .

^h Les valeurs pour la pomme correspondent à la phénologie de la McIntosh.

Pour le blé, le soya et le maïs, on a supposé que le producteur sèmerait peu de temps après le début de la saison de croissance (DSC) afin de maximiser son rendement. Le DSC a été calculé selon la méthode proposée dans l'Atlas agroclimatique du Québec (2012). Les degrés-jours cumulés nécessaires à l'émergence et à la maturation des cultures, à l'exception de la maturation pour la pomme, proviennent du Centre informatique de prévision des ravageurs en agriculture (CIPRA), développé au Centre de recherche et développement en horticulture d'AAC, à Saint-Jean-sur-Richelieu. Pour le blé, le maïs et le soya, la date du travail du sol a été fixée au lendemain de la récolte. La date exacte du travail du sol n'a pas un impact significatif sur le transport de pesticides, puisque les applications d'herbicides ont lieu tôt en saison pour ces cultures (plus de détails à la Section 4.2.2). Pour la pomme, le début de la saison de croissance a été fixé au 1^{er} mars, et l'émergence correspond au débourrement tel que modélisé dans CIPRA pour la McIntosh (*Malus pumila* McIntosh). La date de récolte a été fixée à la fin septembre (entre le 17 septembre et le 1^{er} octobre), sans égard aux conditions climatiques.

4.2.2 Scénarios d'application des pesticides

Le Tableau 3 présente les herbicides considérés, leur taux d'application et leur fenêtre d'application pour le blé, le maïs et le soya. Chaque ingrédient actif a été analysé indépendamment. Le nom IUPAC (pour *International Union of Pure and Applied Chemistry*) et les propriétés chimiques de chaque ingrédient actif sont indiqués à l'Annexe A. On a supposé qu'une seule application d'herbicide par saison était nécessaire. Les herbicides retenus sont parmi les plus utilisés au Québec pour ces cultures (Danielle Bernier, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, MAPAQ, communication personnelle). Les taux d'application et les stades phénologiques déterminant les fenêtres d'application ont été déterminés à partir des informations disponibles sur le site internet SAgE pesticides (2014; <http://www.sagepesticides.qc.ca>), mis en œuvre par le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Pour certains ingrédients actifs, les intervalles de taux d'application sont larges; le taux d'application maximal peut être le triple du taux minimal et même plus pour le dicamba (Tableau 3). Les intervalles de taux d'application ont été déterminés dans le but de couvrir l'ensemble des situations possibles pour une culture donnée. Les degrés-jours nécessaires pour atteindre les stades phénologiques ont été déterminés à partir des modèles du CIPRA. Les jours avec une hauteur de pluie supérieure à 1 mm ont été exclus de la fenêtre d'application.

Tableau 3. Herbicides considérés et leur fenêtre d’application.

Culture	Ingrédient actif	Taux d’application (kg/ha)	Fenêtre d’application (degrés-jours après semis ^a)
Blé	Bromoxynil	0,17	178-758 DJ0 ^c
	Fenoxaprop-p-éthyl	0,03-0,09	
	Pyrasulfotole	0,03-0,09	
	Thifensulfuron-méthyle	0,01	
	Tribenuron-méthyle	0,005	
Maïs	Atrazine	0,53-1,49	1-61 DJ10 ^c
	Dicamba	0,29-1,14	1-182 DJ10
	Glyphosate ^b	0,9-1,8	62-220 DJ10 ^c
	Mésotrione	0,14	1-61 DJ10 ^c
	S-métolachlore	0,6-1,6	1-182 DJ10
Soya	Bentazone	0,84-1,08	149-457 DJ10 ^c
	Glyphosate ^b	0,9-2,52	149-457 DJ10 ^c
	Imazéthapyr	0,075-0,1	62 DJ10 – 100 j avant récolte
	Quizalofop-p-éthyl	0,06	149-457 DJ10 ^c
	Thifensulfuron-méthyle	4,13-6,0	149-457 DJ10 ^c

^aLes dates de semis sont définies au Tableau 2.

^bUniquement pour les variétés génétiquement modifiées résistantes au glyphosate.

^cScénario retenu pour l’évaluation des variables climatiques influentes (Section 4.6.2). DJx = degrés-jours base x °C calculés selon la méthode sinus simple (Baskerville et Emin, 1969).

Le Tableau 4 présente les insecticides retenus pour la pomme, qui sont parmi les plus utilisés au Québec pour contrer les trois insectes ravageurs considérés dans ce projet. Les taux d’application et le délai minimal avant la récolte ont été obtenus de SAgE pesticides (2014). Les fenêtres d’application ont été déterminées à partir de l’information contenue dans le guide de l’utilisateur du CIPRA. La première application est effectuée à la nouaison, pour protéger le pommier contre le charançon de la prune. Les deuxième et troisième applications servent à contrer les première et deuxième générations du carpocapse de la pomme, respectivement. La troisième application permet également de lutter contre la mouche de la pomme. Contrairement à d’autres études réalisées dans des régions plus chaudes et pour des horizons temporels plus lointains (Luedeling *et al.*, 2011; Hirschi *et al.*, 2012; Juszczak *et al.*, 2013), une troisième génération du carpocapse de la pomme n’a pas été considérée dans le présent projet. Comme pour les herbicides, les jours avec une hauteur de pluie supérieure à 1 mm ont été exclus de la fenêtre d’application d’insecticides. La fenêtre de la première application n’étant que d’une seule journée, l’application a été remise à la veille ou au lendemain si la hauteur de pluie durant la journée d’application prévue dépassait 1 mm.

Tableau 4. Insecticides considérés et leurs fenêtres d'application (pomme seulement).

Ingrédient actif	Taux d'application (kg/ha)	Délai minimal avant récolte	Application 1 (degrés-jours)*	Application 2 (degrés-jours)*	Application 3 (degrés-jours)*
Acétamipride	0,08-0,17	7 j	371 DJ5	273-374 DJ10	793-865 DJ10
Phosmet	1,88	14 j			
Spinétorame	0,11	7 j			
Thiaclopride	0,14-0,21	30 j			

* La date du début du calcul des degrés-jours est définie au Tableau 2. DJx = degrés-jours base x °C calculés selon la méthode sinus simple (Baskerville et Emin, 1969).

Les applications de fongicides et de bactéricides sont plus complexes, puisqu'elles dépendent à la fois des stades phénologiques du pommier, de la température et de l'humidité (pluie, rosée). Pour contrer les infections de type I de la tavelure, on a supposé que le producteur appliquerait un fongicide si les quatre conditions suivantes étaient réunies : (i) c'est la période d'éjection des ascospores, (ii) le dernier traitement n'est plus efficace, (iii) le nombre d'heures de mouillure est suffisant et (iv) il s'est écoulé au moins deux jours depuis le dernier traitement. C'est la période d'éjection des ascospores lorsqu'il y a entre 50 et 400 degrés-jours base 5 °C (calculés selon la méthode standard) cumulés depuis le 1^{er} avril (Carisse et Jobin, 2006). On a supposé que le dernier traitement n'était plus efficace si au moins une des trois conditions suivantes était respectée : cinq nouvelles feuilles ou plus ont poussé depuis le dernier traitement (voir l'Annexe B), au moins 25 mm de pluie est prévu entre le surlendemain de la dernière application et le lendemain de la date d'application prévue, ou il s'est écoulé plus de 10 jours depuis le dernier traitement. Les conditions déterminant si le nombre d'heures de mouillure est suffisant ont été établies par Carisse et Jobin (2006) et sont présentées à l'Annexe B.

Ce scénario comporte quelques éléments arbitraires (ex. : nombre de feuilles poussées, délai minimal entre deux applications, valeur seuil pour le cumul de pluie) qui pourraient varier d'un producteur à l'autre. Néanmoins, le scénario établi est réaliste et pourrait être appliqué par un producteur (Roland Joannin, Agropomme, communication personnelle). On a supposé que le producteur avait bien contrôlé la tavelure et, par conséquent, qu'il n'avait pas à appliquer d'autres pesticides pour lutter contre les infections de type II qui pourraient survenir à l'été.

Trois ingrédients actifs ont été considérés (Tableau 5). Afin de mieux isoler l'impact de l'ingrédient actif, toutes les applications au cours d'une même année sont faites avec le même ingrédient actif. Les taux d'application utilisés proviennent de l'information tirée de SAgE pesticides (2014).

Tableau 5. Fongicides considérés pour contrer la tavelure du pommier.

Ingrédient actif	Taux applications 1 et 2 (kg/ha)	Taux applications 3 et + (kg/ha)
Captane	3,0	1,5
Mancozèbe	4,5	3,75
Métiram	4,8	1,13

Par ailleurs, les applications de bactéricides contre le feu bactérien se produisent entre les stades bouton rose et calice (van der Zwet *et al.*, 1990), c'est-à-dire entre 197 et 313 degrés-jours base 5 °C calculés selon la méthode sinus simple, conformément au guide de l'utilisateur du CIPRA. La date du début du cumul des degrés-jours est donnée au Tableau 2. Il y a application si la « valeur de risque » (*risk value*) cumulée des quatre derniers jours, calculée par le modèle de prévision *CougarBlight* 2010 (Smith, 2010), dépasse 100 (voir l'Annexe C). Il y a un maximum d'une application tous les quatre jours et de trois applications par année. Smith (2010) suggère aussi qu'il faut que les feuilles soient mouillées durant au moins trois heures pour qu'une application soit nécessaire. Selon le modèle estimant le nombre d'heures de mouillure élaboré pour la tavelure (Annexe B), cette condition est presque toujours respectée et n'a pas été considérée ici. Le sulfate de streptomycine est le seul ingrédient actif considéré contre le feu bactérien et est appliqué à un taux de 1,36 kg/ha, comme on le suggère dans SAgE pesticides (2014).

Toutes les applications de pesticides simulées étaient par pulvérisation. Bien que les méthodes d'application ne soient pas les mêmes d'une culture à l'autre, le modèle de transport considère toutes les applications de la même façon. Il considère une interception de l'ingrédient actif proportionnelle au couvert végétal; le reste se retrouve à la surface du sol et peut s'infiltrer dans les premiers centimètres du sol (plus de détails à la Section 4.4).

Les simulations sont faites séparément pour chaque ingrédient actif pour pouvoir isoler l'impact de chacun. Chaque série de 60 ans est simulée en supposant qu'un seul ingrédient actif est utilisé. En pratique, les producteurs utilisent différents ingrédients actifs d'une application à l'autre afin de limiter l'apparition de résistance et ils peuvent appliquer un mélange de plusieurs ingrédients actifs lors d'une même application. Des simulations tenant compte de ces pratiques auraient permis d'évaluer l'impact des changements climatiques pour des scénarios d'application réels, mais l'impact de chaque ingrédient actif aurait été masqué.

4.2.3 Mesures d'adaptation

Des mesures d'adaptation permettant potentiellement de diminuer les charges transportées de pesticides ont été simulées. Ces mesures peuvent être liées ou pas au climat. Elles permettent de relativiser l'impact des changements climatiques par rapport aux mesures qui peuvent être prises sur le terrain. Il faut noter cependant que puisque les simulations produisent des estimations *in situ*, sans tenir compte du transport vers un environnement plus vaste (p. ex., sous-bassin

versant, cours d'eau), les mesures d'adaptation reliées à l'aménagement du territoire adjacent aux champs cultivés, telles que les bandes riveraines (Rousseau *et al.*, 2012; Sabbagh *et al.*, 2013) et les milieux humides artificiels (Lizotte *et al.*, 2012), n'ont pu être considérées. Aussi, les impacts des mesures interannuelles visant à diminuer l'abondance de l'ennemi, comme la rotation des cultures (Gagnon *et al.*, 2013) et le brûlage des feuilles du pommier à l'automne (Carisse et Jobin, 2006), n'ont pu être simulés puisqu'ils sont difficilement quantifiables.

Tableau 6. Mesures d'adaptation simulées.

Mesure d'adaptation	Pratique initiale	Pratique après adaptation	Cas considérés
Non-application la veille d'une pluie	Application si $P(j) < 1$ mm	Application si $P(j)$ et $P(j+1) < 1$ mm	Application de phosmet
Variation du seuil de pluie	Application si $P(j) < 1$ mm	Application si $P(j) < x$ mm ($x = 0,1$ ou 5)	Application de phosmet
Travail réduit du sol	Labour classique à l'automne	Travail réduit à l'automne, glyphosate en présemis	Maïs résistant au glyphosate
Semis direct	Labour classique à l'automne	Aucun travail à l'automne, glyphosate en présemis	Maïs résistant au glyphosate
Incorporation dans le sol	Pulvérisation en prélevée	Incorporation dans le sol en prélevée	Application d'atrazine

Le Tableau 6 présente les mesures d'adaptation considérées. Afin de limiter le temps de calcul, seuls certains cas particuliers ont été considérés pour chaque mesure.

4.3 Sites étudiés

La Figure 1 indique l'emplacement des 28 sites étudiés. Ces sites sont des champs réels sélectionnés à partir de la base de données des cultures généralisées de la Financière agricole du Québec (FADQ). Pour chaque site, la plante retenue, ou une des cultures retenues, était réellement cultivée en 2012. Près de la moitié des sites sont situés dans le sud de la vallée du Saint-Laurent, autour de Montréal, mais d'autres sites couvrent la partie plus au nord de la vallée du Saint-Laurent, jusqu'à Québec, ainsi que l'Estrie, la Beauce, le Lac-Saint-Jean et Charlevoix-Ouest. La répartition géographique des sites vise à couvrir une grande partie des conditions climatiques et des types de sols présents sur le territoire agricole québécois. Le type de sol à chaque site a été déterminé à partir des feuillets pédologiques de l'IRDA (2013). Les propriétés pour chaque type de sol ont été récupérées de la base nationale de données sur les sols du Service d'information sur les sols du Canada d'AAC (2010). Les données numériques d'élévation ayant servi au calcul des pentes proviennent de Ressources naturelles Canada (2000). Les principales caractéristiques de chaque site sont présentées à l'Annexe D. Étant donné la

superficie des sites (< 40 ha), la température et la précipitation journalières y sont considérées comme homogènes, et un seul point de la grille de Ressources naturelles Canada (Hutchinson *et al.*, 2009; Hopkinson *et al.*, 2011) est utilisé par site pour représenter le climat local (Section 4.1).

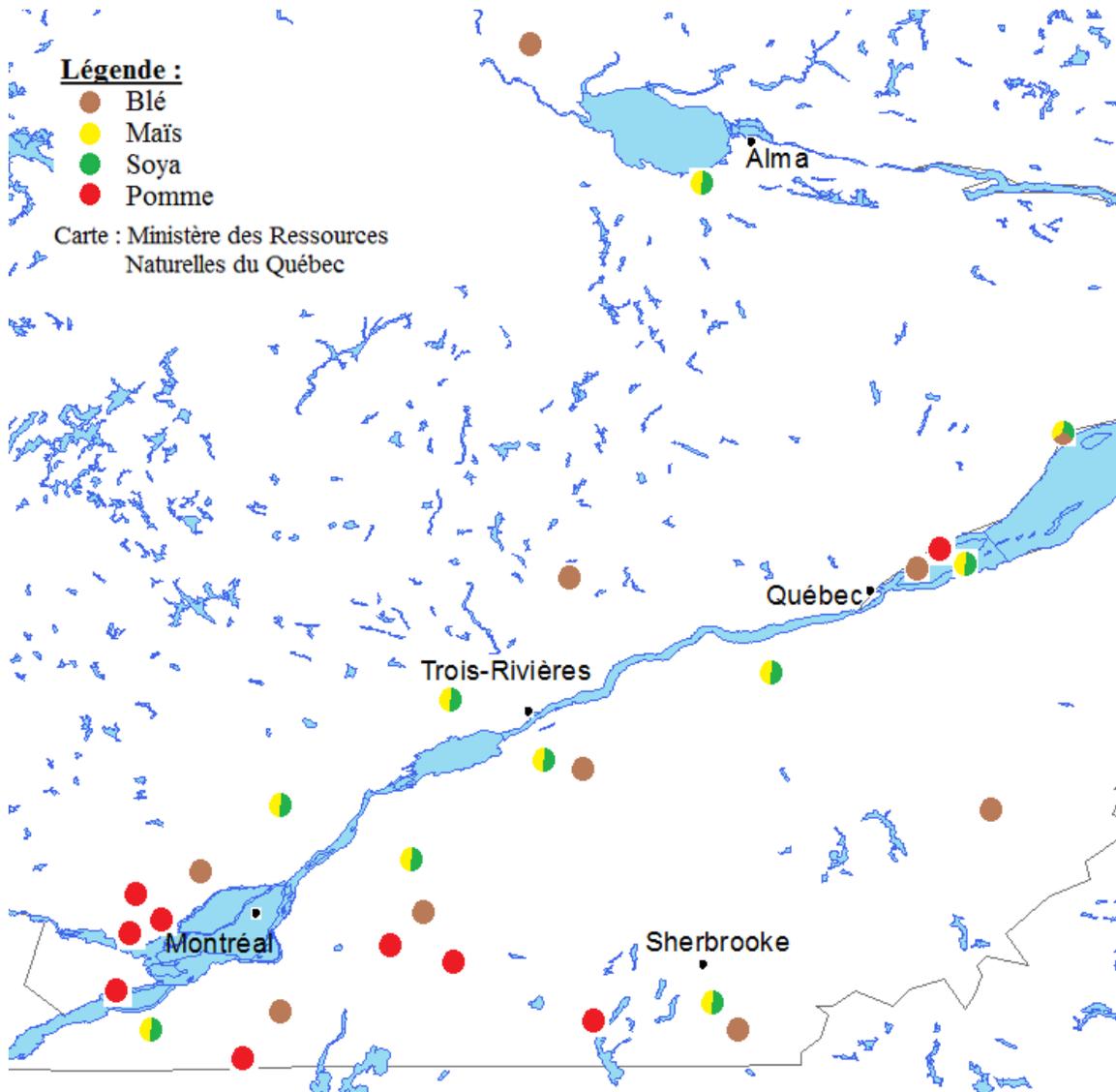


Figure 1. Sites à l'étude.

4.4 Modèle de transport des pesticides dans l'eau

Le modèle de transport de pesticides PRZM (*Pesticide Root Zone Model*) version 3.12.3 est utilisé (Suarez, 2005). Ce modèle a été développé par le *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) et est disponible gratuitement à l'adresse suivante : <http://www2.epa.gov/exposure-assessment-models/przm-version-index>.

Ce modèle a été beaucoup utilisé, et plusieurs études ont montré qu'il produisait des résultats acceptables (p. ex., Carbone *et al.*, 2002; Singh et Jones, 2002; Warren-Hicks *et al.*, 2002; Farenhorst *et al.*, 2009) tout en demandant relativement peu de temps de calcul (McQueen *et al.*, 2007).

PRZM est un modèle à une dimension qui fait des simulations sur une colonne verticale du sol et qui génère des valeurs de concentrations et de charges de pesticides au bord du champ (*edge-of-field*). Il simule au pas de temps journalier et prend en entrée notamment des données météorologiques (précipitation, température, évapotranspiration), des propriétés du sol (Annexe D), les caractéristiques des applications de pesticides (p. ex., dates d'application, produits utilisés, dosage, méthode d'application) et des renseignements sur les pratiques agricoles (p. ex., travail du sol, irrigation). Ce modèle a deux principales composantes : une composante hydrologique et une composante transport chimique. Les processus hydrologiques les plus importants pour ce projet sont le ruissellement de surface et l'érosion hydrique. Le ruissellement de surface est gouverné par le *curve number*, un paramètre empirique élaboré par le *United States Department of Agriculture* (USDA, 2004) et souvent utilisé en hydrologie. L'érosion peut être calculée selon trois équations au choix de l'utilisateur (Suarez, 2005), toutes basées sur la *Universal Soil Loss Equation* (USLE), aussi élaborée par le USDA et souvent utilisée. Les paramètres de transport chimique les plus importants sont le coefficient d'adsorption ou de distribution sol/eau (K_d), qui est égal au produit du coefficient de partage carbone organique/eau du pesticide (K_{oc}) et de la fraction de carbone organique dans le sol, puis le taux de dégradation journalier, qui est déterminé à partir de la demi-vie du pesticide dans le sol (Dubus et Janssen, 2003). Les paramètres du PRZM les plus importants pour le projet sont présentés à l'Annexe E. Pour une description détaillée du modèle PRZM, le lecteur est prié de se reporter à Suarez (2005).

4.5 Modèle stochastique

En modélisation, il y a de l'incertitude causée par l'imprécision et la représentativité des données d'entrée ainsi que par la représentation de processus naturels complexes par des équations simplifiées. Également, la grande variabilité spatio-temporelle des valeurs de ces paramètres impose un niveau d'incertitude important lorsque des conditions de terrain sont considérées. Afin de tenir compte de l'impact de ces sources d'incertitude sur les valeurs des paramètres, une sélection des paramètres selon la méthode de Monte-Carlo a été appliquée (p. ex., Warren-Hicks *et al.*, 2002). Pour certains paramètres du modèle PRZM sélectionnés, une distribution statistique a été spécifiée (Annexe E). Pour un paramètre donné, la moyenne et l'écart-type pouvaient varier d'un site et d'une culture à l'autre, mais la forme de la distribution demeure toujours la même. La moyenne et l'écart-type d'un paramètre ont été ajustés notamment en fonction de l'ensemble des valeurs suggérées dans le manuel de l'utilisateur du PRZM (Suarez, 2005) et, dans certains cas,

de la variabilité observée entre les couches de sol à partir des données de propriétés du sol d'AAC (2010).

Pour chacun des 22 paramètres sélectionnés, 100 valeurs pseudo-aléatoires ont été générées uniformément dans l'intervalle (0,1), résultant en une matrice de 100 x 22 valeurs pseudo-aléatoires (Annexe F). Dans le reste du rapport, l'ensemble des valeurs formé par la i^{e} valeur aléatoire de tous les paramètres de PRZM considérés (*i. e.*, la i^{e} ligne de la matrice) sera appelé la i^{e} réalisation ($i = \{1, \dots, 100\}$). Pour chaque combinaison site/simulation climatique/culture/ingrédient actif, 100 séries de 60 ans (1981-2040) ont été générées à partir des 100 réalisations. La valeur du paramètre j générée à la réalisation i est le fractile d'ordre f de la distribution statistique du paramètre (Annexe E), où f est l'élément (i,j) de la matrice pseudo-aléatoire (Annexe F). L'approche stochastique permet à la fois d'obtenir un intervalle de résultats probables de charges transportées de pesticides au lieu d'une seule valeur et de mieux évaluer l'impact des paramètres sur les résultats. À noter que des valeurs fixes (*i. e.*, invariantes d'une série à l'autre) ont été utilisées pour les propriétés des ingrédients actifs (Annexe A). L'impact des valeurs de ces propriétés sur les résultats a pu être évalué en comparant les résultats de différents ingrédients actifs.

4.6 Variables pertinentes retenues

Le choix des variables-réponses et des variables climatiques possiblement influentes est présenté dans cette section. Il y a d'autres variables influentes non reliées au climat, mais étant donné que le projet porte sur l'impact des changements climatiques, seules certaines de ces variables ont été analysées lors de l'évaluation de l'impact des mesures d'adaptation.

4.6.1. Variables-réponses

La principale variable-réponse retenue est la charge transportée dans l'eau de ruissellement, qui représente la masse de pesticides par unité de surface qui peut quitter le champ et contaminer l'environnement. Cet indicateur est présenté en grammes par hectare (g/ha).

Les analyses ont été faites séparément pour les pesticides dissous dans l'eau et pour les pesticides adsorbés sur les particules de sol qui sont transportées par le sol érodé dans l'eau de ruissellement. Pour la plupart des ingrédients actifs, qui présentent généralement une bonne solubilité dans l'eau, on s'attend à ce que les charges transportées sous forme dissoute soient significativement plus grandes que celles sous forme adsorbée (Bloomfield *et al.*, 2006; Cessna *et al.*, 2010; Gagnon *et al.*, 2014). Les valeurs maximales annuelles journalières et les moyennes annuelles ont été analysées.

L'évaluation de l'impact des changements climatiques a été faite en analysant la tendance sur 60 ans et en comparant les moyennes sur 30 ans (1981-2010 et 2011-2040). La tendance a été évaluée à partir du test non paramétrique de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1970). Avec

ce test, on obtient le signe de la pente (positive, négative ou, dans de rares cas, nulle) et un seuil observé, qui représente la probabilité d'obtenir une tendance aussi forte en supposant que les données proviennent d'une distribution stationnaire. Il est usuel de considérer une tendance significative si le seuil observé est inférieur à 5 %. Ce test non paramétrique ne requiert pas que les données suivent une distribution normale, ni même que la variance soit constante dans le temps. Les moyennes sur 30 ans permettent d'illustrer les différences entre le passé et le futur dans l'absolu.

Les charges simulées sont aussi exprimées en proportion de la masse de pesticides appliquée par unité de surface. La proportion transportée dans l'eau est une mesure de la perte d'efficacité du traitement liée au ruissellement de surface.

Les concentrations moyennes annuelles et maximales annuelles journalières par ingrédient actif sont aussi présentées. La concentration dans l'eau de ruissellement permet d'évaluer les risques pour la protection de certaines activités agricoles (p. ex., irrigation, abreuvement du bétail). Cet indicateur est présenté en microgrammes par litre ($\mu\text{g/L}$). Puisque le modèle de transport utilisé simule sur une dimension (*i. e.*, sur une colonne de sol), les concentrations obtenues sont applicables à l'échelle de la ferme, et non comparables aux concentrations des lacs ou des rivières. Les concentrations présentées dans ce rapport ne doivent pas être utilisées pour évaluer le risque de contamination des organismes aquatiques ou de l'eau potable.

4.6.2 Variables climatiques influentes

L'incidence du climat sur les charges de pesticides transportées dans l'eau est principalement attribuable aux dates d'application et aux hauteurs de pluie durant les jours suivant l'application.

Pour les herbicides et les insecticides, les dates d'application dépendent principalement des températures, selon le cumul des degrés-jours, et aussi des hauteurs de pluie, puisque selon les scénarios considérés pour les herbicides et les insecticides, les applications ne sont pas permises s'il tombe plus d'un millimètre de pluie au cours d'une journée donnée (Section 4.2.2). Ainsi, l'évolution des dates de début et de fin des fenêtres d'application a été analysée. Les degrés-jours cumulés définissant les fenêtres d'application d'herbicides sont présentés au Tableau 3 (Section 4.2.2). Pour le maïs, on retient la fenêtre de l'atrazine et du mésotrione (1 à 61 degrés-jours base 10 °C, prélevée) et la fenêtre du glyphosate (62 à 220 degrés-jours base 10 °C, postlevée). Pour le soya, la fenêtre couvre de 149 à 457 degrés-jours base 10 °C cumulés depuis le semis (fenêtre de tous les ingrédients actifs retenus, sauf l'imazéthapyr). Les fenêtres pour les trois applications d'insecticides pour la pomme sont présentées au Tableau 4 (Section 4.2.2). L'évolution du nombre de jours dans la fenêtre d'application ayant reçu moins d'un millimètre de pluie a aussi été analysée. Pour toutes ces variables, l'analyse porte uniquement sur les différences sur 30 ans. Il y a trop d'égalités sur l'ensemble des 60 valeurs annuelles, ce qui empêche l'évaluation adéquate de la tendance à l'aide du test de Mann-Kendall.

Les dates d'application de fongicides et de bactéricides dépendent aussi du cumul de degrés-jours, mais surtout des conditions d'humidité et des cumuls de pluie. Pour les deux maladies du pommier retenues, c'est l'évolution du nombre d'applications qui a été analysée. Étant donné le grand nombre d'égalités sur les 60 valeurs annuelles, l'analyse porte uniquement sur les différences sur 30 ans.

Les hauteurs de pluie suivant les applications sont déterminantes pour le transport des pesticides. Les variables retenues sont les hauteurs de pluie maximales journalières et les hauteurs totales cumulées durant la fenêtre d'application. Pour ces deux variables, l'évaluation de la tendance sur 60 ans par le test de Mann-Kendall est possible. Les différences sur 30 ans ont aussi été analysées. Étant donné que les fenêtres d'application sont relativement de courte durée, le nombre de jours avec des précipitations importantes (p. ex., pluie > 25 mm) est très limité et n'a pas été analysé.

5 Résultats

5.1 Évolution des variables climatiques

Dans cette section, l'impact des changements climatiques durant la période 1981-2040 est évalué pour les variables climatiques susceptibles d'avoir une incidence sur le transport de pesticides dans l'eau de ruissellement sur les sites étudiés (Section 4.6.2).

5.1.1 Dates d'application pour les herbicides et les insecticides

Pour chaque combinaison site/culture/simulation climatique, il y a 60 années avec, pour chacune d'elles, une fenêtre d'application d'herbicides (blé, maïs en prélevée, maïs en postlevée et soya) ou trois fenêtres d'application d'insecticides (pomme). Au total, cela représente 230 séries (10 sites x 23 simulations climatiques) pour le blé, le maïs (prélevée et postlevée) et le soya, et 207 séries (9 sites x 23 simulations climatiques) pour la pomme. Puisque les fenêtres d'application dépendent des dates de semis et que ces dates ne varient que légèrement d'une réalisation à l'autre (Tableau 2, Section 4.2.1), seule la fenêtre médiane parmi les 100 réalisations a été retenue pour chaque combinaison site/culture/simulation climatique. La différence sur 30 ans a été calculée sur chaque série pour chacune des variables suivantes : date de début de la fenêtre, date de fin de la fenêtre et durée de la fenêtre (en excluant les jours ayant reçu plus d'un millimètre de pluie).

La Figure 2 présente, pour le blé, le maïs (prélevée et postlevée) et le soya, des diagrammes en boîte illustrant les changements de dates moyens entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour les applications d'herbicides, ainsi que la variabilité inter-sites (Figure 2a) et inter-simulations climatiques (Figure 2b). Les critères définissant les fenêtres d'application d'herbicides sont présentés au Tableau 3 (Section 4.2.2). Les diminutions moyennes sur 30 ans varient de 2 à 6 jours pour l'ensemble des sites et des trois cultures (Figure 2a). Les différences sont légèrement plus importantes pour les dates de fin que pour les dates de début des fenêtres. La variabilité inter-simulations climatiques (Figure 2b) est plus grande que la variabilité inter-sites (Figure 2a). Il y a même 12 cas, sur un total de 184 (23 simulations climatiques x 8 variables), pour lesquels les différences moyennes sur 30 ans sont positives (*i. e.*, dates d'application plus tardives dans l'avenir). Six de ces cas proviennent du membre 2 du MCCG3, simulé selon le scénario de GES A2. Deux autres cas proviennent du même membre, simulé selon le scénario B1. Les quatre autres cas proviennent du membre 5 du MCCG3, simulé selon le scénario de GES B1. Il est à noter que pour la date de fin de la fenêtre pour le soya, qui est la date la plus tardive considérée dans ce projet pour les applications d'herbicides, toutes les simulations climatiques donnent des diminutions sur 30 ans.

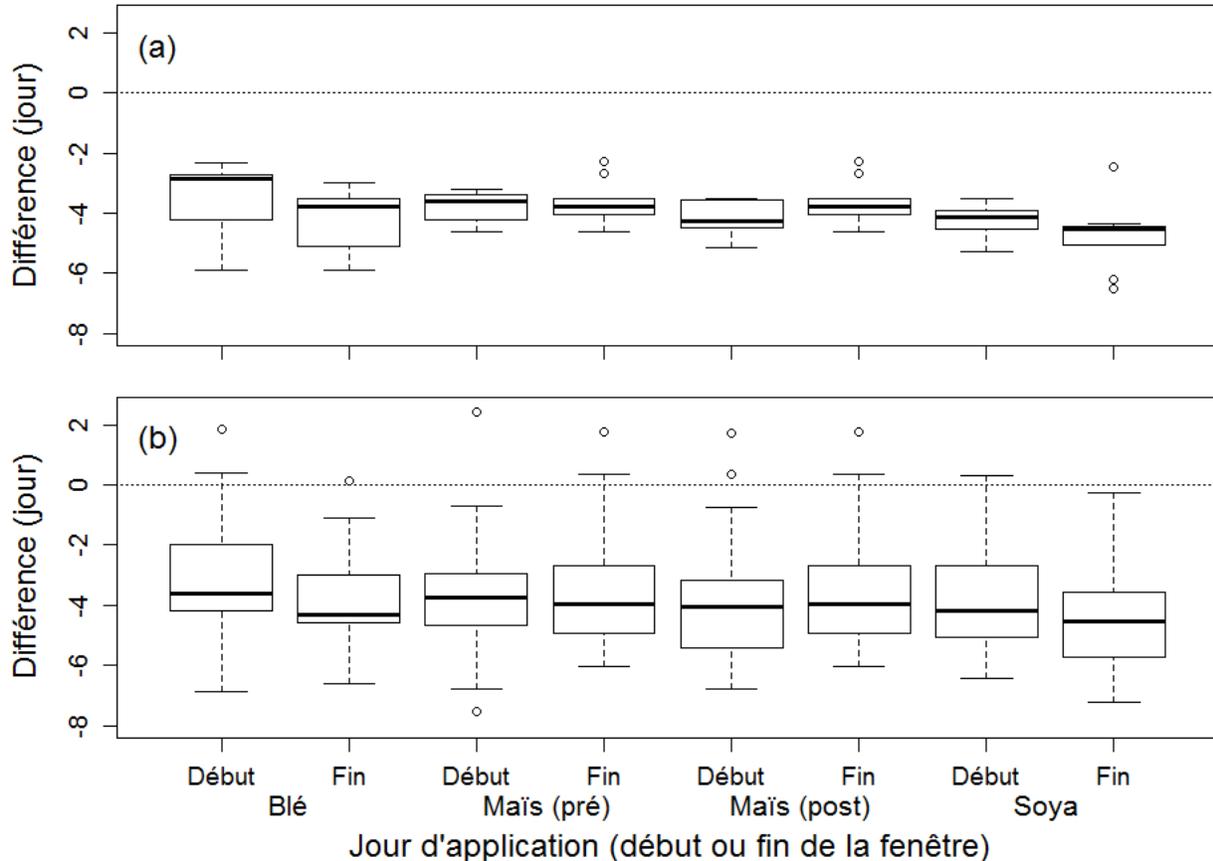


Figure 2. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour les dates de début et de fin de la fenêtre d'application d'herbicides. Chaque diagramme est construit à partir de : (a) 10 données, soit la médiane des différences moyennes des 23 simulations climatiques pour chacun des 10 sites (variabilité inter-sites); (b) 23 données, soit la médiane des différences moyennes des 10 sites pour chacune des 23 simulations climatiques (variabilité inter-simulations climatiques). Pré = prélevée; post = postlevée.

Pour les insecticides utilisés pour la pomme, le devancement des dates d'application est encore plus clair. Les diminutions moyennes sur 30 ans sont d'environ 3,5 et 8 jours pour la première application et la fin de la fenêtre de la troisième application, respectivement (Figure 3). Le devancement moyen sur 30 ans dépasse 10 jours pour la fin de la fenêtre de la troisième application pour les deux vergers les plus éloignés de Montréal, soit le site 25 situé dans les Appalaches près du lac Memphrémagog, en Estrie, et le site 26 situé sur l'île d'Orléans (Section 4.3 et Annexe D). Les critères définissant les fenêtres d'application d'insecticides sont présentés au Tableau 4 (Section 4.2.2). Comme pour les applications d'herbicides, la variabilité inter-simulations climatiques (Figure 3b) est plus grande que la variabilité inter-sites (Figure 3a). Il est à noter que dans moins de un pour cent des années, une troisième application ne serait pas possible puisqu'elle se produirait moins de sept jours avant la récolte.

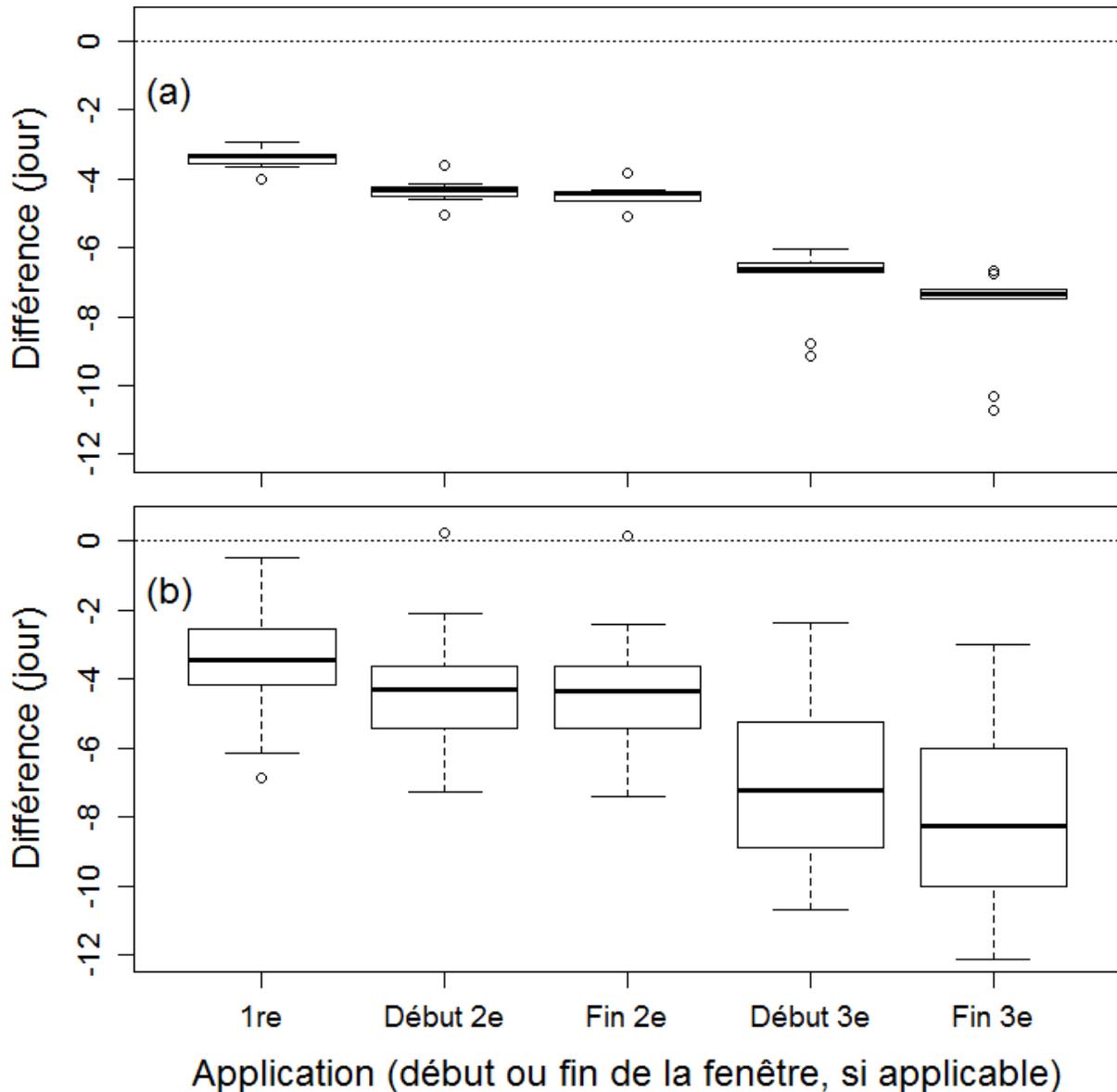


Figure 3. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour les dates d'application d'insecticides pour la pomme. Chaque diagramme est construit à partir de : (a) 9 données, soit la médiane des différences moyennes des 23 simulations climatiques pour chacun des 9 sites (variabilité inter-sites); (b) 23 données, soit la médiane des différences moyennes des 9 sites pour chacune des 23 simulations climatiques (variabilité inter-simulations climatiques).

La Figure 4 illustre la différence moyenne sur 30 ans du nombre de jours disponibles pour les applications. Les différences sont très majoritairement inférieures à un jour. Les différences sont généralement négatives, étant donné que l'augmentation des températures diminue légèrement la longueur des fenêtres d'application (Figures 2 et 3). En outre, il n'y a pas de changement significatif pour la proportion de jours où plus d'un millimètre de pluie est tombé.

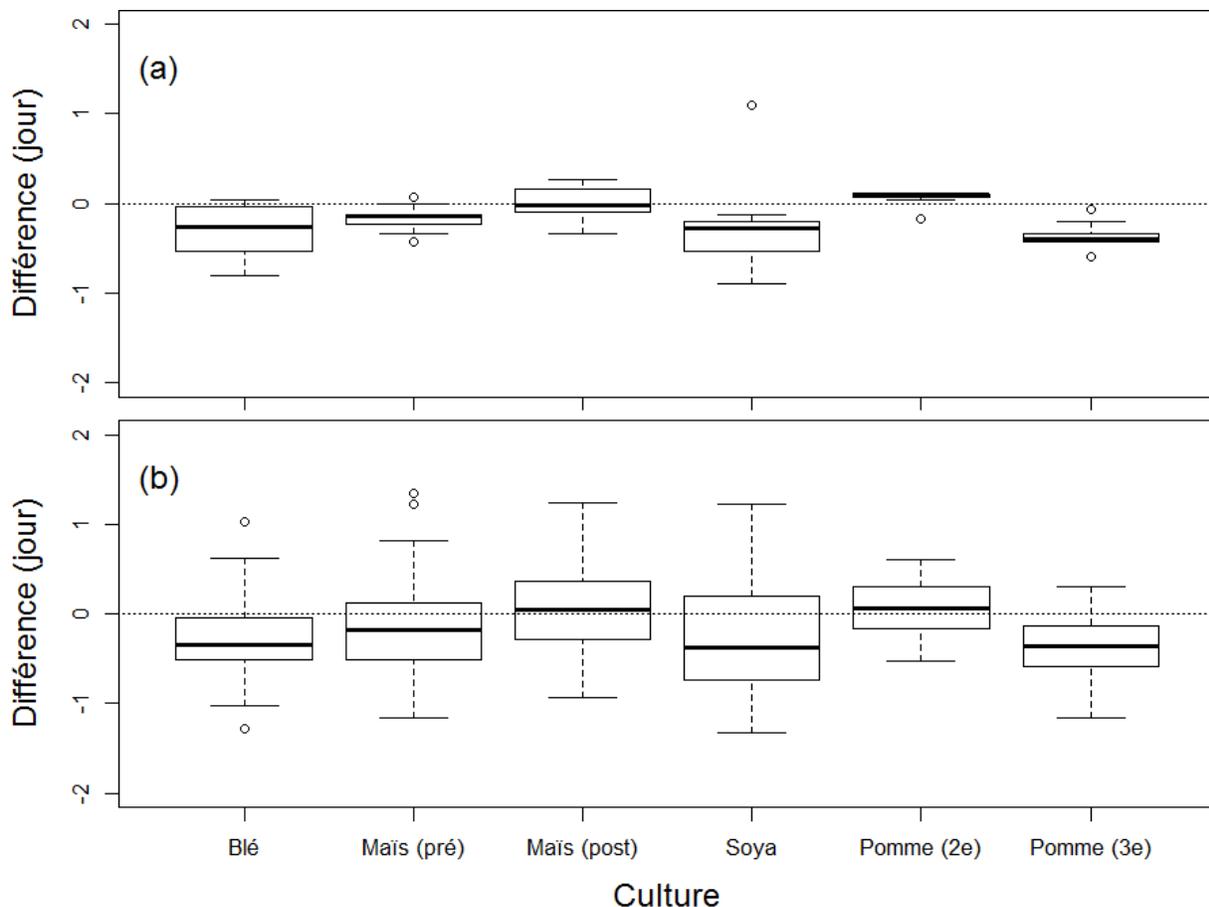


Figure 4. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour le nombre de jours où les applications d’herbicides et d’insecticides sont possibles. Chaque diagramme est construit à partir de : (a) 9 (pomme) ou 10 (autres) données, soit la médiane des différences moyennes des 23 simulations climatiques pour chacun des sites (variabilité inter-sites); (b) 23 données, soit la médiane des différences moyennes des sites pour chacune des 23 simulations climatiques (variabilité inter-simulations climatiques). Pré = prélevée; post = postlevée. 2e, 3e = 2^e, 3^e application.

En somme, l’impact des changements climatiques est clair sur les dates d’application d’herbicides et d’insecticides pour les sites et la période (1981-2040) considérés. Les dates d’application sont directement liées à la température. Plus les applications ont lieu tard dans la saison (*i. e.*, plus le cumul de degrés-jours nécessaire à l’application est grand), plus l’impact est grand (Figures 2 et 3). Le nombre de jours dans les fenêtres d’application demeure stable sur la période de 60 ans (Figure 4), avec des diminutions moyennes inférieures à un jour. Les différences touchant les dates d’application et la durée des fenêtres d’application auraient été plus grandes si la période future avait été plus lointaine. À titre d’exemple, dans Gagnon *et al.* (2013), les dates d’émergence pour la pyrale du maïs sont devancées d’environ deux semaines entre les périodes 1970-1999 et 2041-2070, et les périodes d’intervention sont raccourcies de plus d’une journée.

5.1.2 Nombre d'applications de fongicides et de bactéricides

La Figure 5 illustre le changement moyen du nombre d'applications de fongicides contre la tavelure du pommier entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 avec les variabilités inter-sites et inter-simulations climatiques. En moyenne, le nombre d'applications par année augmente d'environ 0,1 entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040, mais cette augmentation est non significative. Néanmoins, sept des neuf sites retenus montrent une augmentation moyenne. Les deux vergers les plus éloignés de Montréal (sites 25 et 26, Section 4.3 et Annexe D) se distinguent des autres en montrant une très faible diminution moyenne du nombre d'applications. Par rapport aux 23 simulations climatiques, les résultats sont partagés. Par exemple, il y a 7 simulations climatiques pour lesquelles il y a une augmentation moyenne sur 30 ans pour tous les 9 sites, et 6 pour lesquelles il y a diminution pour tous les sites. Cela implique que pour un site donné, il y a toujours des simulations climatiques qui donnent des différences positives et d'autres qui donnent des différences négatives.

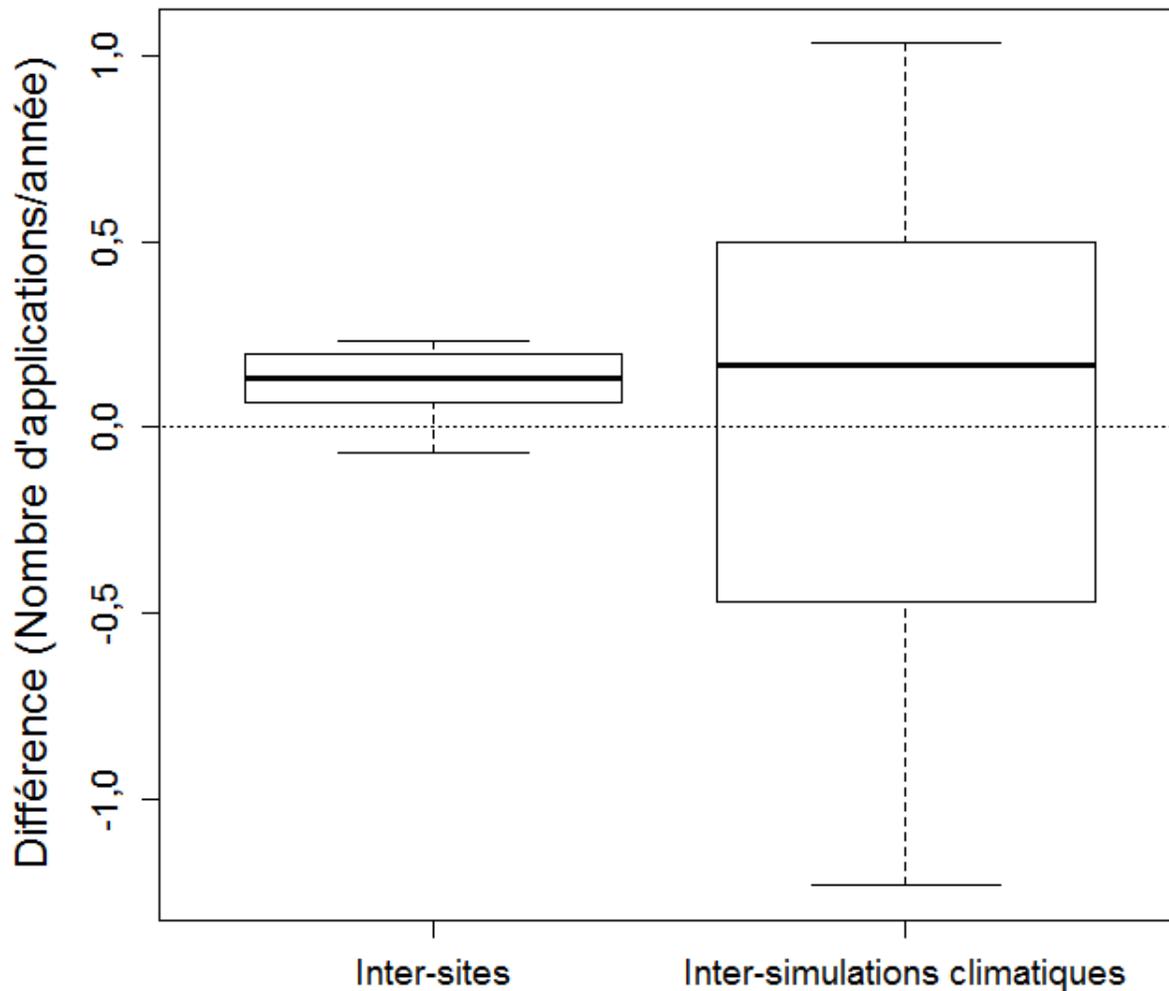


Figure 5. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour le nombre d'applications de fongicides contre la tavelure du pommier. Chaque diagramme est construit à partir

de : (gauche; « Inter-sites ») 9 données, soit la médiane des différences moyennes des 23 simulations climatiques pour chacun des 9 sites; (droite; « Inter-simulations climatiques ») 23 données, soit la médiane des différences moyennes des 9 sites pour chacune des 23 simulations climatiques.

La Figure 6 présente le changement moyen du nombre d'applications de bactéricides contre le feu bactérien (pommier) entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040. Il n'y a pas de changement, car la principale variable qui limite le nombre d'applications est la durée de la fenêtre d'application, qui est relativement courte. Le devancement de la fenêtre d'application n'a que très peu d'impact sur sa durée, puisqu'elle est en début de saison. Un constat semblable avait été obtenu par Hirschi *et al.* (2012).

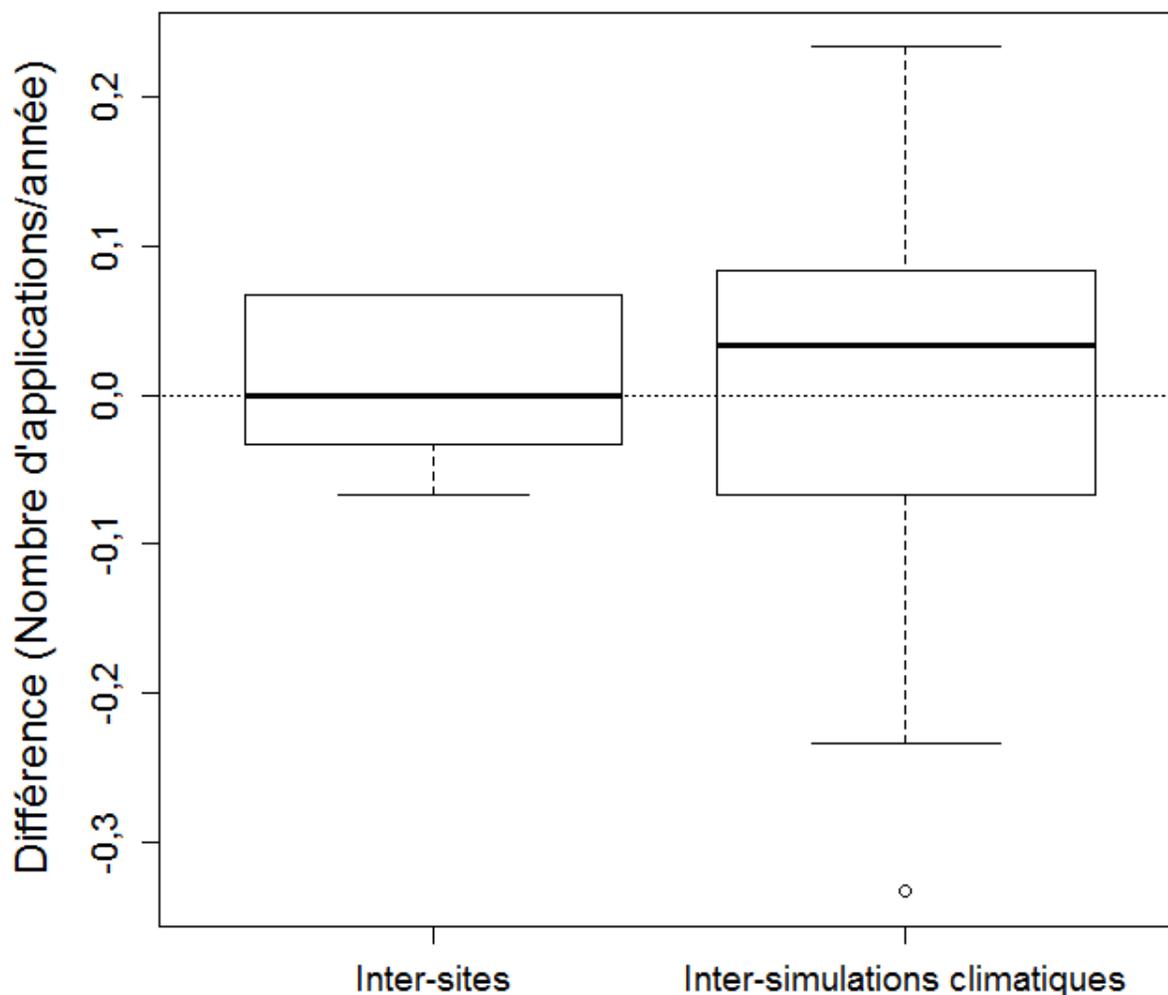


Figure 6. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour le nombre d'applications de bactéricides contre le feu bactérien (pommier). Chaque diagramme est construit à partir de : (gauche; « Inter-sites ») 9 données, soit la médiane des différences moyennes des 23 simulations climatiques pour chacun des 9 sites; (droite; « Inter-simulations climatiques ») 23 données, soit la médiane des différences moyennes des 9 sites pour chacune des 23 simulations climatiques.

5.1.3 Pluie journalière maximale

Les événements de pluie les plus importants sont ceux survenant peu de temps après l'application. Chaque année, pour chaque combinaison site/culture/simulation climatique, la pluie journalière maximale a été extraite d'une fenêtre temporelle centrée sur la date médiane d'application d'herbicides ou d'insecticides parmi les 100 réalisations. Le terme *mobile* est utilisé en référence à cette fenêtre, puisque son centre varie d'une année à l'autre. La durée des fenêtres a été fixée à 31 jours pour les applications d'herbicides et à 11 jours pour les applications d'insecticides, ce qui correspond approximativement aux durées moyennes des fenêtres d'application. Le Tableau 7 synthétise les résultats du test de Mann-Kendall pour la tendance sur 60 ans de la pluie journalière maximale durant ces fenêtres temporelles pour les applications d'herbicides (blé, maïs et soya) et d'insecticides (pomme). La proportion de tendances positives varie de 37,2 % (deuxième application d'insecticide pour la pomme) à 63,5 % (application en prélevée pour le maïs). Dans l'ensemble, le nombre de tendances positives est légèrement supérieur au nombre de tendances négatives, surtout pour les applications en début de saison, mais la proportion de tendances statistiquement significatives est inférieure à 5 %, sauf pour l'application en prélevée pour le maïs (6,1 % de tendances positives) et pour les deuxième et troisième applications d'insecticides pour la pomme (7,2 et 6,3 % de tendances négatives, respectivement). Il n'y a donc pas de tendance claire pour la pluie journalière maximale durant la fenêtre d'application.

Tableau 7. Résultats du test de Mann-Kendall appliqué sur la pluie journalière maximale durant la fenêtre mobile pour la période 1981-2040, pour chaque combinaison culture/site/simulation climatique. Les scénarios d'application retenus sont présentés au Tableau 3 pour le blé, le maïs et le soya et au Tableau 4 pour la pomme. Les fenêtres sont centrées sur la date médiane d'application calculée chaque année. Une tendance est jugée significative si le seuil observé du test est inférieur à 0,05.

Culture	Nombre de tests	Nombre de tendances positives		Nombre de tendances négatives	
		Significatives	Total	Significatives	Total
Blé	230	2 (0,9 %)	123 (53,5 %)	3 (1,3 %)	107 (46,5 %)
Maïs (prélevée)	230	14 (6,1 %)	146 (63,5 %)	2 (0,9 %)	84 (36,5 %)
Maïs (postlevée)	230	6 (2,6 %)	111 (48,3 %)	1 (0,4 %)	118 (51,3 %)
Soya	230	4 (1,7 %)	118 (51,3 %)	5 (2,2 %)	111 (48,3 %)
Pomme (1 ^{re} application)	207	4 (1,9 %)	115 (55,6 %)	5 (2,4 %)	91 (44,0 %)
Pomme (2 ^e application)	207	6 (2,9 %)	77 (37,2 %)	15 (7,2 %)	129 (62,3 %)
Pomme (3 ^e application)	207	6 (2,9 %)	111 (53,6 %)	13 (6,3 %)	96 (46,4 %)

La fenêtre d'application suit l'évolution du climat. Un début de saison plus chaud que la moyenne fera devancer les applications, alors qu'un début de saison plus froid les retardera. Afin de se soustraire de la variation interannuelle des dates d'application, les pluies maximales annuelles journalières ont aussi été extraites d'une fenêtre temporelle centrée sur la date médiane

d'application pour l'ensemble des 60 ans, donc identique d'une année à l'autre, pour chaque combinaison site/culture/simulation climatique. Le terme *fixe* est utilisé en référence à cette fenêtre. Les durées des fenêtres ont encore été fixées à 31 et 11 jours pour les applications d'herbicides et d'insecticides, respectivement. Les résultats du test de Mann-Kendall sont présentés au Tableau 8. Dans l'ensemble, il y a plus de tendances à la hausse qu'au Tableau 7. C'est vrai pour toutes les applications d'herbicides. Les tests effectués sur une fenêtre temporelle fixe sur les 60 ans indiquent même une augmentation de plus de 10 % du nombre de tendances positives pour l'application en postlevée pour le maïs par rapport aux tests effectués sur la fenêtre mobile, qui varie d'une année à l'autre en fonction de la température et qui représente de manière plus réaliste la période d'application. Ces résultats suggèrent que l'ajustement de la fenêtre d'application en fonction de la météo saisonnière pourrait permettre de réduire, dans une certaine mesure, l'impact des changements climatiques. Cependant, cet effet n'est pas significatif d'un point de vue statistique; le nombre de tendances significatives demeure faible (Tableau 8).

Tableau 8. Résultats du test de Mann-Kendall appliqué sur la pluie journalière maximale durant la fenêtre d'application fixe pour la période 1981-2040, pour chaque combinaison culture/site/simulation climatique. Les scénarios d'application retenus sont présentés au Tableau 3 pour le blé, le maïs et le soya et au Tableau 4 pour la pomme. Les fenêtres sont centrées sur la date médiane d'application calculée sur l'ensemble des 60 années. Une tendance est jugée significative si le seuil observé du test est inférieur à 0,05.

Culture	Nombre de tests	Nombre de tendances positives		Nombre de tendances négatives	
		Significatives	Total	Significatives	Total
Blé	230	3 (1,3 %)	137 (59,6 %)	1 (0,4 %)	92 (40,0 %)
Maïs (prélevée)	230	19 (8,3 %)	148 (64,3 %)	0 (0 %)	82 (35,7 %)
Maïs (postlevée)	230	5 (2,2 %)	136 (59,1 %)	4 (1,7 %)	93 (40,4 %)
Soya	230	6 (2,6 %)	135 (58,7 %)	7 (3,0 %)	95 (41,3 %)
Pomme (1 ^{re} application)	207	4 (1,9 %)	109 (52,7%)	4 (1,9 %)	94 (45,4 %)
Pomme (2 ^e application)	207	3 (1,5 %)	89 (43,0 %)	12 (5,8 %)	118 (57,0 %)
Pomme (3 ^e application)	207	10 (4,8 %)	106 (51,2 %)	6 (2,9 %)	101 (48,8 %)

La Figure 7 illustre la différence moyenne entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 de la pluie journalière maximale durant les fenêtres d'application mobiles et fixes. La différence moyenne sur 30 ans est généralement légèrement supérieure pour les fenêtres fixes (Figure 7b) que pour les fenêtres mobiles (Figure 7a), ce qui corrobore les résultats des Tableaux 7 et 8. L'écart entre les fenêtres mobiles et fixes est plus important pour les applications d'herbicides, qui ont lieu au printemps. En calculant la moyenne sur toutes les simulations climatiques à chaque site, on obtient une augmentation moyenne entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour presque toutes les combinaisons sites/fenêtres fixes d'application d'herbicides (39/40). Pour les

combinaisons sites/fenêtres mobiles d'application d'herbicides, on obtient une augmentation moyenne dans seulement 26 cas sur 40. Cependant, les augmentations demeurent minimales par rapport à la variabilité entre les combinaisons site/simulation climatique.

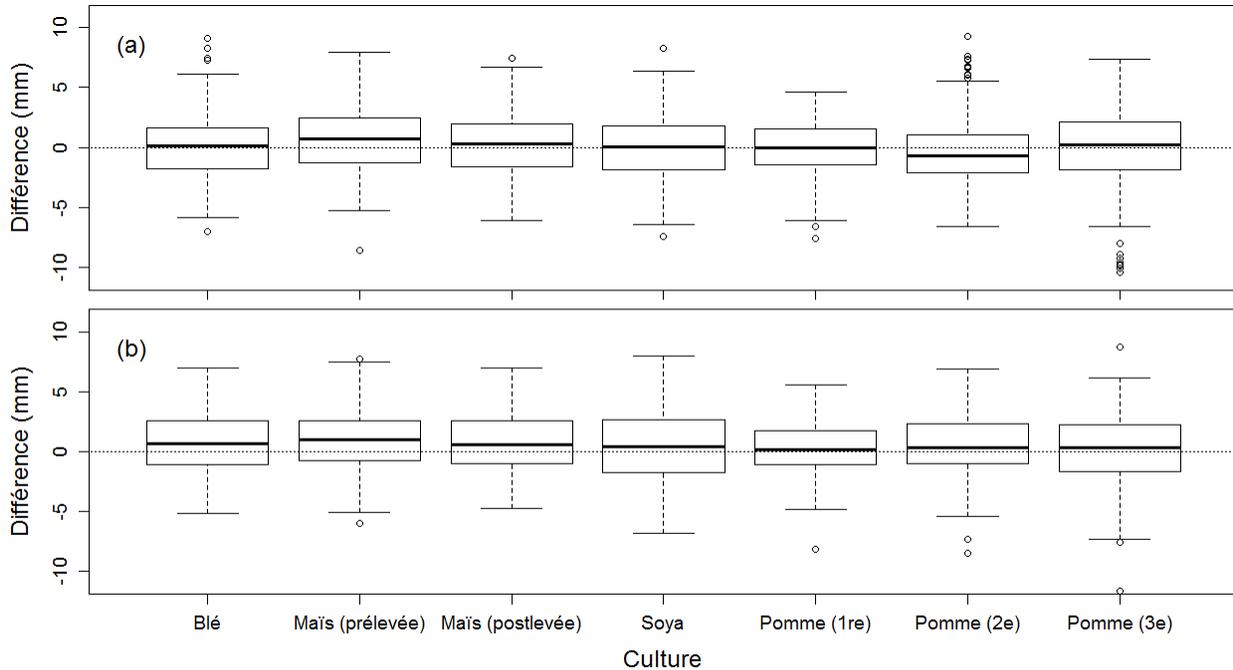


Figure 7. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour la pluie journalière maximale durant les fenêtres d'application (a) mobiles et (b) fixes. Les diagrammes sont construits à partir de toutes les combinaisons site/simulation climatique pour une culture donnée (207 pour la pomme, 230 pour les autres cultures).

5.1.4 Pluie journalière moyenne

Le Tableau 9 synthétise les résultats du test de Mann-Kendall pour la tendance sur 60 ans de la pluie journalière moyenne durant les fenêtres d'application mobiles telles que calculées à la Section 5.1.3. Il y a moins de tendances à la hausse pour la pluie moyenne que pour la pluie maximale journalière (Tableau 7) et peu d'entre elles sont statistiquement significatives. Il n'y a donc pas d'impact clair des changements climatiques sur la pluie journalière moyenne durant la fenêtre d'application (1981-2040) pour les sites considérés.

Le Tableau 10 présente les résultats du test de Mann-Kendall effectué sur la pluie moyenne journalière durant la période 1981-2040 durant les fenêtres d'application fixes telles que calculées à la Section 5.1.3. Comme pour la pluie maximale journalière, il y a moins de tendances positives à l'échelle des fenêtres d'application mobiles, qui varient d'une année à l'autre, qu'à l'échelle des fenêtres d'application fixes. Cependant, dans l'absolu, les différences sur 30 ans entre le passé et le futur sont faibles par rapport à la variabilité entre les combinaisons site/simulation climatique, que ce soit à l'échelle des fenêtres d'application mobiles ou fixes (Figure 8).

Tableau 9. Résultats du test de Mann-Kendall appliqué sur la pluie journalière moyenne durant la fenêtre d'application mobile pour la période 1981-2040, pour chaque combinaison culture/site/simulation climatique. Les scénarios d'application retenus sont présentés au Tableau 3 pour le blé, le maïs et le soya et au Tableau 4 pour la pomme. Les fenêtres sont centrées sur la date médiane d'application calculée chaque année. Une tendance est jugée significative si le seuil observé du test est inférieur à 0,05.

Culture	Nombre de tests	Nombre de tendances positives		Nombre de tendances négatives	
		Significatives	Total	Significatives	Total
Blé	230	1 (0,4 %)	106 (46,1 %)	4 (1,7 %)	122 (53,0 %)
Maïs (prélevée)	230	6 (2,6 %)	123 (53,5 %)	0 (0 %)	106 (46,1 %)
Maïs (postlevée)	230	3 (1,3 %)	97 (42,2 %)	3 (1,3 %)	132 (57,4 %)
Soya	230	2 (0,9 %)	102 (44,3 %)	9 (3,9 %)	125 (54,3 %)
Pomme (1 ^{re} application)	207	4 (1,9 %)	132 (63,8 %)	2 (1,0 %)	75 (36,2 %)
Pomme (2 ^e application)	207	2 (1,0 %)	75 (36,2 %)	17 (8,2 %)	131 (63,3 %)
Pomme (3 ^e application)	207	11 (5,3 %)	109 (52,7 %)	10 (4,8 %)	97 (46,9 %)

Tableau 10. Résultats du test de Mann-Kendall appliqué sur la pluie journalière moyenne durant la fenêtre d'application fixe pour la période 1981-2040, pour chaque combinaison culture/site/simulation climatique. Les scénarios d'application retenus sont présentés au Tableau 3 pour le blé, le maïs et le soya et au Tableau 4 pour la pomme. Les fenêtres sont centrées sur la date médiane d'application calculée sur l'ensemble des 60 années. Une tendance est jugée significative si le seuil observé du test est inférieur à 0,05.

Culture	Nombre de tests	Nombre de tendances positives		Nombre de tendances négatives	
		Significatives	Total	Significatives	Total
Blé	230	10 (4,3 %)	128 (55,7 %)	5 (2,2 %)	98 (42,6 %)
Maïs (prélevée)	230	17 (7,4 %)	132 (57,4 %)	2 (0,9 %)	98 (42,6 %)
Maïs (postlevée)	230	10 (4,3 %)	129 (56,1 %)	2 (0,9 %)	100 (43,5 %)
Soya	230	6 (2,6 %)	107 (46,5 %)	8 (3,5 %)	123 (53,5 %)
Pomme (1 ^{re} application)	207	3 (1,4 %)	144 (69,6 %)	1 (0,5 %)	62 (30,0 %)
Pomme (2 ^e application)	207	3 (1,4 %)	91 (44,0 %)	14 (6,8 %)	115 (55,6 %)
Pomme (3 ^e application)	207	16 (7,7 %)	105 (50,7 %)	2 (1,0 %)	102 (49,3 %)

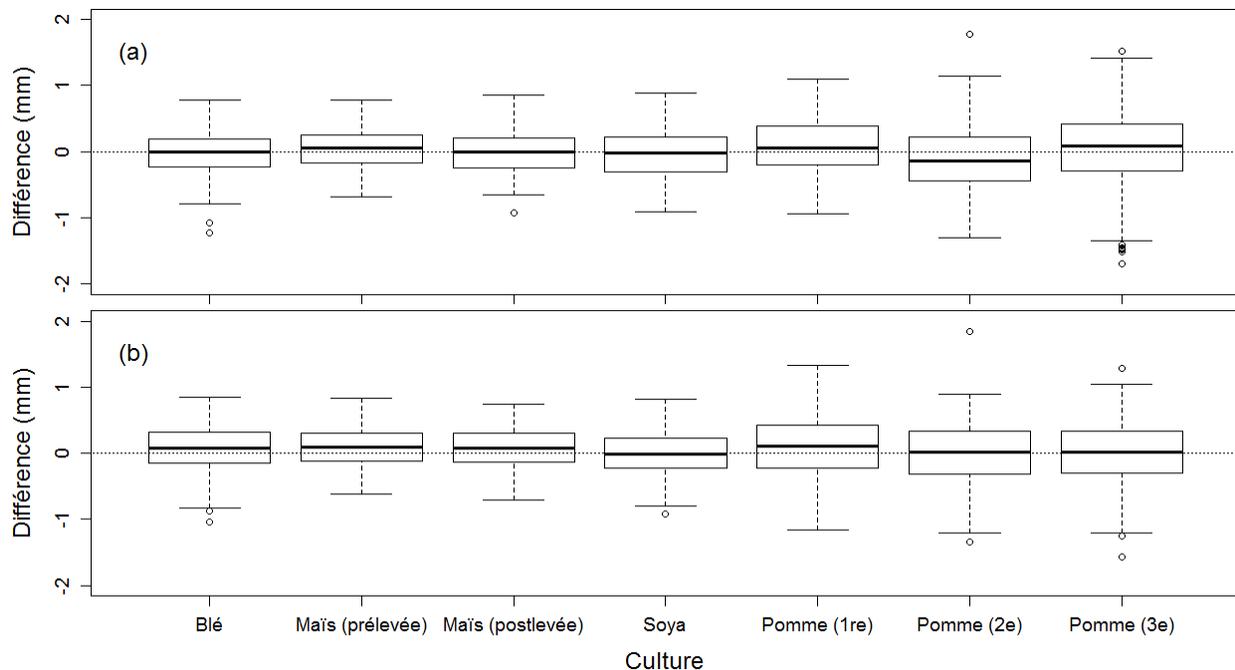


Figure 8. Diagrammes en boîte des différences moyennes entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 pour la pluie journalière moyenne durant les fenêtres d’application (a) mobiles et (b) fixes. Les diagrammes sont construits à partir de toutes les combinaisons site/simulation climatique pour une culture donnée (207 pour la pomme, 230 pour les autres cultures).

5.2 Contamination de l’eau de ruissellement par les pesticides

Les analyses ont été faites séparément pour les charges sous formes dissoute et adsorbée (transportée dans le sol érodé). Les valeurs d’intérêt sont les charges maximales annuelles journalières et les charges moyennes annuelles. Cependant, la corrélation entre ces deux variables est très grande. En effet, sur toutes les combinaisons site/simulation climatique/culture/ingrédient actif/réalisation, la proportion de la charge totale sur 60 ans provenant des charges maximales annuelles journalières est d’environ 85 % pour la forme dissoute et 90 % pour la forme adsorbée, en moyenne. Les charges maximales annuelles journalières produisent plus de la moitié de la charge totale simulée sur 60 ans dans 97 et 99 % des cas pour les formes dissoute et adsorbée, respectivement. C’est pourquoi seules les charges moyennes annuelles ont été analysées. La perte relative moyenne et la concentration moyenne dans l’eau de ruissellement sont aussi présentées pour chaque ingrédient actif.

5.2.1. Évolution de la charge annuelle transportée sous forme dissoute

Au total, il y a 510 600 séries annuelles (combinaisons site/simulation climatique/culture/ingrédient actif/réalisation) et autant de tendances estimées à partir du test de Mann-Kendall. La Figure 9 présente des diagrammes en boîte illustrant la proportion des tendances positives obtenues par site, par ingrédient actif, par réalisation et par simulation climatique.

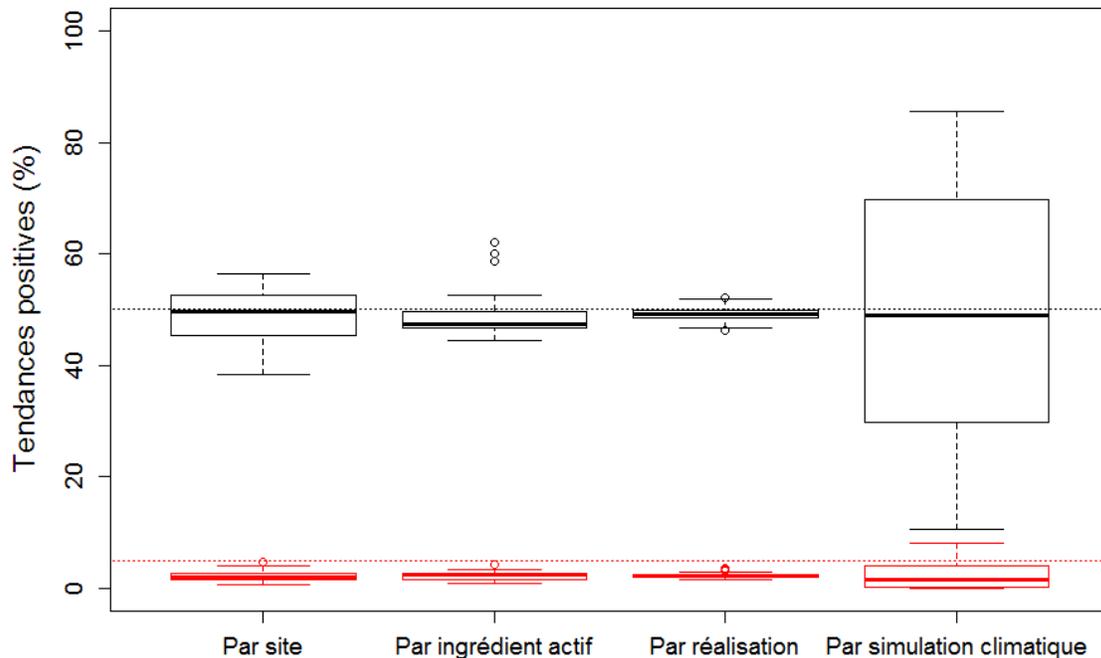


Figure 9. Proportion de tendances positives (%) pour la charge annuelle transportée sous forme dissoute, obtenues pour chacun des 28 sites, 21 ingrédients actifs, 100 réalisations et 23 simulations climatiques. Les diagrammes en boîtes rouges illustrent les proportions de tendances positives qui sont significatives selon le test de Mann-Kendall. La ligne rouge correspond au seuil du test (5 %).

En moyenne, il y a environ la moitié des tendances qui sont positives, et donc environ la moitié des tendances qui sont négatives, mais très peu de ces tendances sont statistiquement significatives. L'impact des changements climatiques sur les charges transportées est donc très limité, à l'exception des trois fongicides considérés pour contrer la tavelure (captane, mancozèbe et métiram). Pour ces trois ingrédients, il y a environ 60 % des tendances qui sont positives. Ces tendances à la hausse sont causées par la légère augmentation en moyenne du nombre d'applications annuelles entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 (Figure 5). Dans l'absolu, la charge moyenne de captane transportée annuellement sous forme dissoute passe de 1,32 g/ha pour la période 1981-2010 à 1,44 g/ha pour la période 2011-2040. Le captane étant très volatil (Annexe A), cette charge correspond à moins de 0,01 % de la masse appliquée annuellement en moyenne. Pour le mancozèbe, encore plus volatil (Annexe A), la charge moyenne transportée annuellement passe de $3,79 \times 10^{-3}$ à $4,15 \times 10^{-3}$ g/ha. Pour le métiram, volatil et très peu mobile (Annexe A), la charge moyenne transportée annuellement passe de $3,47 \times 10^{-3}$ à $4,07 \times 10^{-3}$ g/ha. En somme, l'augmentation moyenne de la charge transportée sous forme dissoute entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 est de l'ordre de 10 % pour ces trois fongicides, mais les valeurs sont faibles dans l'absolu. Il faut noter que la proportion des tendances à la hausse qui sont statistiquement significatives est faible. Des séries plus longues auraient vraisemblablement permis de détecter plus de tendances significatives.

Il y a une très grande variabilité entre les 23 simulations climatiques; le pourcentage de tendances positives varie de 10 à 85 %. Cela illustre que la variabilité « naturelle » est plus importante que le signal de changement climatique. Les résultats de la Section 5.1 avaient déjà indiqué une variabilité inter-simulations climatiques plus forte que la variabilité inter-sites pour les variables climatiques influentes. Il y a néanmoins une certaine variabilité entre les sites. La caractéristique des sites (Annexe D) ayant la plus forte corrélation avec la proportion de tendances positives est la capacité au champ, avec 32 %. Hormis les trois ingrédients actifs pour contrer la tavelure, la variabilité entre les ingrédients actifs est faible.

L'impact des changements climatiques sur les charges transportées ne varie que très peu d'une réalisation à l'autre (Figure 9). Néanmoins, les différences entre les réalisations, bien que faibles, indiquent que certains paramètres du PRZM peuvent avoir un impact sur l'évolution de la charge annuelle dans le temps. Le Tableau 11 présente, pour chaque paramètre, la corrélation entre la proportion de tendances positives par réalisation et la valeur pseudo-aléatoire servant à générer le paramètre (Annexe F). Les résultats indiquent que l'évolution de la charge annuelle varie significativement selon les valeurs choisies pour deux paramètres. Le paramètre KP, régissant la capacité au champ et le point de flétrissement, est corrélé positivement à 47 % avec la proportion de tendances positives. Cela corrobore les résultats de l'analyse de l'évolution des charges par site. Le contenu en carbone organique du sol étant positivement corrélé à la capacité au champ, le paramètre OC est également positivement corrélé à la proportion de tendances à la hausse pour la charge annuelle. Il faut noter que ces paramètres ont un impact statistiquement significatif, mais limité en valeur absolue (Figure 9).

Tableau 11. Coefficient de corrélation de Pearson (%) entre la proportion de tendances positives par réalisation et la valeur pseudo-aléatoire servant à générer chaque paramètre (Annexe F). Les astérisques indiquent si la corrélation est statistiquement significative (* : < 0,1; ** : < 0,05; * : < 0,01). La définition des paramètres est donnée à l'Annexe E.**

Paramètre	Corrélation	Paramètre	Corrélation	Paramètre	Corrélation
SFAC	0,05	MNGN	-0,05	UPTKF	0,01
CINTCP	-0,16	CN	0,13	FEXTRC	-0,09
AMXDR	-0,06	DEPI	0,05	KP et BD	0,47***
COVMAX	-0,07	TAPP	-0,07	OC	0,41***
HTMAX	-0,18*				

L'évolution de la charge transportée sur 30 ans (1981-2010 par rapport à 2011-2040) a été calculée séparément pour chacune des 222 combinaisons site/culture/ingrédient actif. Pour chaque combinaison, il y a 2 300 différences sur 30 ans (23 simulations climatiques x 100 réalisations). La variabilité inter-simulations climatiques peut être estimée en retenant, pour chaque simulation climatique, la différence moyenne sur les 100 réalisations (23 valeurs). De même, la variabilité inter-réalisations peut être estimée en retenant, pour chaque réalisation, la différence moyenne sur les 23 simulations climatiques (100 valeurs). Des intervalles de

confiance 90 % pour les variabilités inter-simulations climatiques et inter-réalisations ont ainsi été formés à partir de ces 23 et 100 valeurs, respectivement. Pour toutes les 222 combinaisons site/culture/ingrédient actif, l'intervalle 90 % inter-simulations climatiques des différences sur 30 ans contient la valeur 0. Donc, pour les 222 cas, la variabilité entre les simulations climatiques est trop grande pour affirmer qu'il y a un impact significatif.

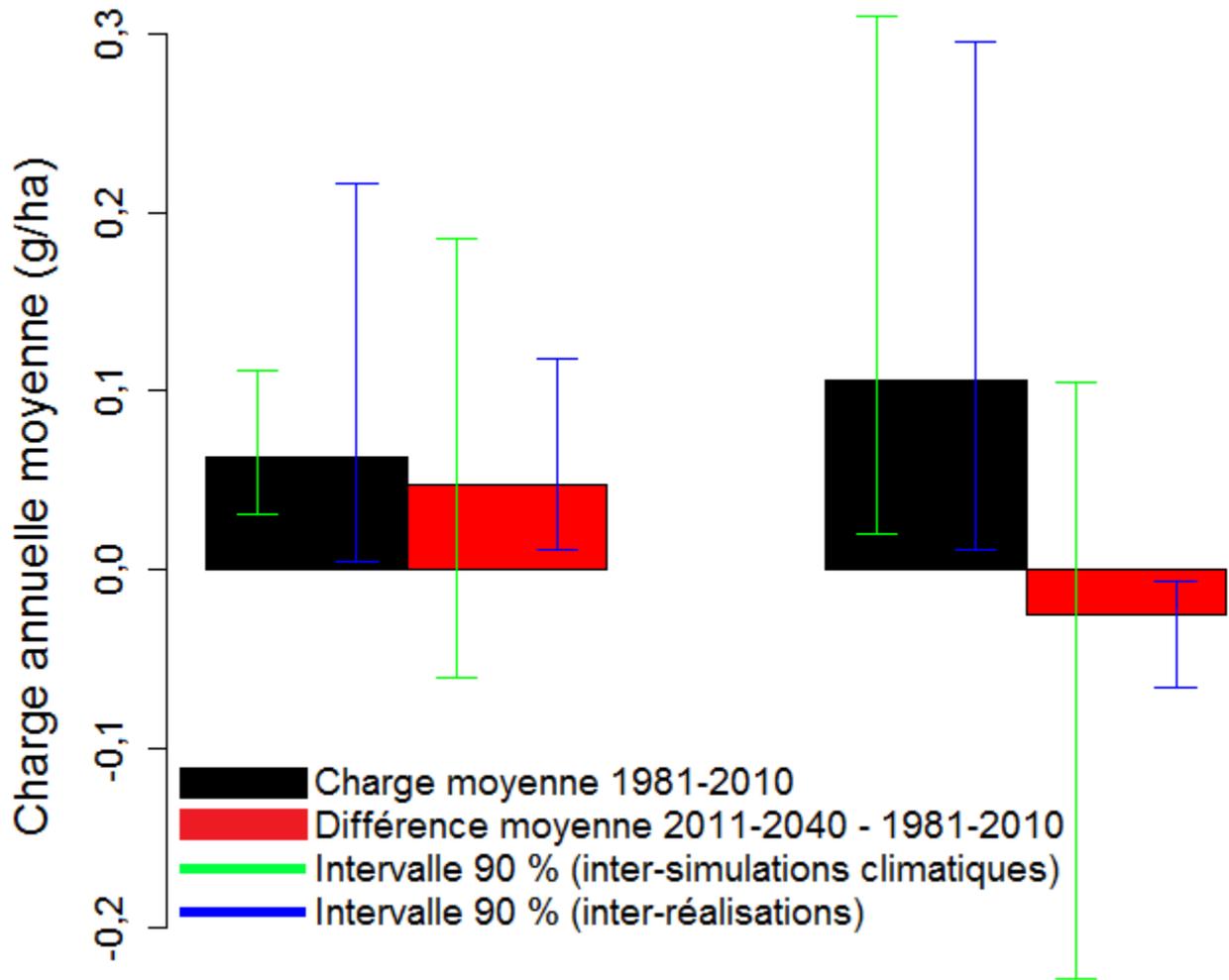


Figure 10. Différences entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 de la charge annuelle moyenne transportée sous forme dissoute pour deux combinaisons site/culture/ingrédient actif. Dans les deux cas, l'ingrédient actif est le sulfate de streptomycine. Gauche : site 28; droite : site 23.

Il y a 39 cas où l'intervalle 90 % inter-réalisations des différences sur 30 ans ne contient pas 0, soit 28 différences moyennes positives et 11 différences moyennes négatives. Deux de ces cas, parmi les plus extrêmes, sont illustrés à la Figure 10. Pour la majorité des 222 charges transportées sur 30 ans (1981-2010), les intervalles inter-réalisations sont plus larges que les intervalles inter-simulations climatiques. Pour la majorité des 222 différences de charges sur 30 ans (1981-2010 par rapport à 2011-2040), c'est l'inverse; les intervalles inter-simulations climatiques sont plus larges que les intervalles inter-réalisations. Les valeurs sélectionnées des

paramètres du modèle de transport ont un impact important sur les valeurs de charges transportées simulées, mais l'évolution temporelle des charges dépend plus du climat que des valeurs des paramètres.

5.2.2 Évolution de la charge transportée sous forme adsorbée

La Figure 11 présente des diagrammes en boîtes illustrant la proportion des tendances positives pour la charge annuelle transportée sous forme adsorbée, obtenues par site, par ingrédient actif, par réalisation et par simulation climatique.

Les résultats sont très semblables à ceux obtenus pour la charge sous forme dissoute, c'est-à-dire que dans l'ensemble, les charges transportées n'augmentent pas significativement durant la période étudiée (1981-2040). Il n'y a pas d'impact visible des changements climatiques, à l'exception des trois ingrédients actifs utilisés pour contrer la tavelure. La corrélation entre la proportion de tendances positives pour les charges annuelles transportées sous formes dissoute et adsorbée est de 97,6 % pour les moyennes par site, 97,2 % pour les moyennes par ingrédient actif, 91,9 % pour les moyennes par réalisation et 99,7 % pour les moyennes par simulation climatique.

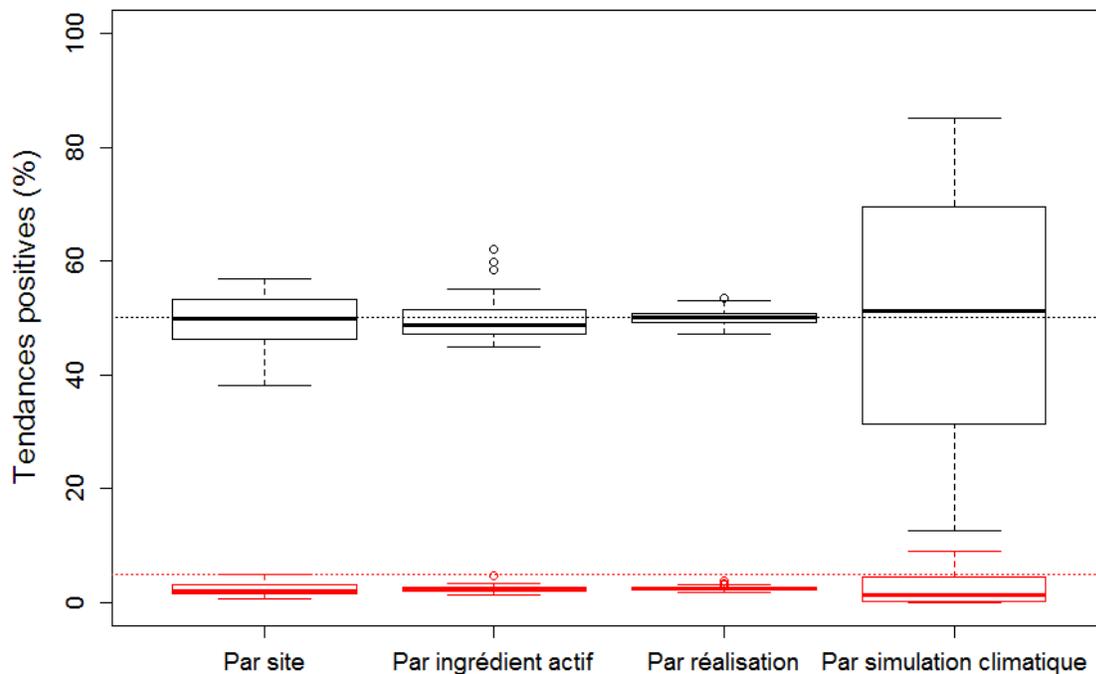


Figure 11. Proportion de tendances positives (%) pour la charge annuelle transportée sous forme adsorbée, obtenues pour chacun des 28 sites, 21 ingrédients actifs, 100 réalisations et 23 simulations climatiques. Les diagrammes en boîtes rouges illustrent le nombre de tendances positives qui sont significatives selon le test de Mann-Kendall. La ligne rouge correspond au seuil du test (5 %).

La différence de la charge transportée sous forme adsorbée sur 30 ans (1981-2010 par rapport à 2011-2040) ainsi que les intervalles de confiance 90 % inter-simulations climatiques et inter-

réalisations sont calculés de la même façon que pour la forme dissoute (Section 5.2.1) pour les 222 combinaisons site/culture/ingrédient actif. Encore une fois, l'intervalle 90 % inter-simulations climatiques des différences sur 30 ans contient la valeur 0 pour toutes les combinaisons. Il y a 29 cas où l'intervalle 90 % inter-réalisations des différences sur 30 ans ne contient pas 0, soit 24 différences moyennes positives et 5 différences moyennes négatives. Comme pour la forme dissoute, la variabilité de la charge sur 30 ans (1981-2010) est plus forte entre les réalisations, alors que la variabilité de la différence de charge sur 30 ans (1981-2010 par rapport à 2011-2040) est plus forte entre les simulations climatiques.

5.2.3 Perte relative moyenne par ingrédient actif

Le Tableau 12 présente la proportion moyenne de la masse appliquée qui est transportée sous formes dissoute et adsorbée pour chaque ingrédient actif. Les pertes moyennes obtenues sont toutes inférieures à 1 %, ce qui corrobore d'autres pourcentages de pertes moyennes par ruissellement de surface obtenues dans la littérature (Wauchope, 1978; Bloomfield *et al.*, 2006). À l'échelle événementielle, les pourcentages de pertes peuvent être plus grands que 1 %. Les ingrédients actifs ayant de longues demi-vies donnent généralement de plus fortes pertes au total. La proportion de la perte provenant de la forme adsorbée augmente avec la valeur de coefficient de partage carbone organique/eau (K_{oc} ; Annexe A).

5.2.4 Concentration moyenne dans l'eau par ingrédient actif

Le Tableau 13 présente les moyennes des concentrations moyennes annuelles et maximales annuelles journalières pour chaque ingrédient actif dans l'eau de ruissellement (somme des formes dissoute et adsorbée). Les concentrations sont accompagnées des valeurs seuils pour la protection des activités agricoles (abreuvement du bétail). Les critères pour la protection de la vie aquatique et de l'eau potable n'ont pas été considérés, puisque le transport des pesticides a été simulé à l'échelle du champ. La moyenne des concentrations maximales annuelles journalières dépasse la valeur seuil de toxicité pour la protection des activités agricoles (abreuvement du bétail) dans deux des sept cas où une valeur seuil est disponible. L'atrazine est un des ingrédients actifs montrant des concentrations transportées simulées parmi les plus fortes, en plus d'être l'ingrédient le plus toxique parmi les six ingrédients ayant un critère de toxicité. Le captane a également une concentration journalière maximale annuelle moyenne supérieure à sa valeur seuil, même si seulement 0,01 % de ce qui est appliqué est transporté dans l'eau de ruissellement (Tableau 12).

Tableau 12. Proportion moyenne de la masse appliquée transportée dans l'eau de ruissellement sous formes dissoute et adsorbée par ingrédient actif.

Culture	Ingrédient actif	Perte sous forme dissoute (%)	Perte sous forme adsorbée (%)	Total (%)
Blé	Bromoxynil	4×10^{-3}	4×10^{-3}	8×10^{-3}
	Fenoxaprop-p-éthyl	3×10^{-5}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
	Pyrasulfotole	0,12	0,09	0,22
	Thifensulfuron-méthyle	0,05	3×10^{-3}	0,05
	Tribenuron-méthyle	0,10	6×10^{-3}	0,11
Maïs	Atrazine	0,12	0,01	0,13
	Dicamba	0,03	2×10^{-4}	0,03
	Glyphosate	0,02	0,07	0,09
	Mésotrione	0,10	0,01	0,11
	S-métolachlore	0,07	0,01	0,08
Soya	Bentazone	0,09	8×10^{-3}	0,10
	Glyphosate	0,02	0,09	0,11
	Imazéthapyr	0,15	0,01	0,16
	Quizalofop-p-éthyl	4×10^{-3}	0,01	0,02
	Thifensulfuron-méthyle	0,04	3×10^{-3}	0,05
Pomme	Acétamipride	0,01	5×10^{-4}	0,01
	Phosmet	9×10^{-3}	8×10^{-4}	9×10^{-3}
	Spinétorame	8×10^{-3}	0,01	0,02
	Thiaclopride	0,05	3×10^{-3}	0,05
	Captane	0,01	5×10^{-4}	0,01
	Mancozèbe	2×10^{-5}	2×10^{-6}	2×10^{-5}
	Métiram	3×10^{-5}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
	Sulfate de streptomycine	0,04	4×10^{-5}	0,04

Tableau 13. Moyenne des concentrations moyennes annuelles et maximales annuelles journalières pour chaque ingrédient actif dans l'eau de ruissellement (somme des formes dissoute et adsorbée). Les valeurs sont les moyennes calculées à partir de toutes les combinaisons site/réalisation/simulation climatique sur les 60 années (1981-2040). La valeur seuil est la valeur utilisée par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC, 2002) pour la protection des activités agricoles (abreuvement du bétail). Cette valeur n'est pas disponible pour tous les ingrédients actifs. Les moyennes supérieures au seuil sont en gras.

Culture	Ingrédient actif	Concentration moyenne annuelle (µg/L)	Concentration journalière maximale annuelle (µg/L)	Valeur seuil (µg/L)
Blé	Bromoxynil	0,02	0,8	11
	Fenoxaprop-p-éthyl	7×10^{-4}	0,03	-
	Pyrasulfotole	0,2	2,8	-
	Thifensulfuron-méthyle	8×10^{-3}	0,3	-
	Tribenuron-méthyle	8×10^{-3}	0,2	-
Maïs	Atrazine	2,4	55	5
	Dicamba	0,4	21	122
	Glyphosate	1,9	53	280
	Mésotrione	0,3	7	-
	S-métolachlore	1,6	43	-
Soya	Bentazone	1,7	44	> 510
	Glyphosate	2,9	78	280
	Imazéthapyr	0,3	6	-
	Quizalofop-p-éthyl	0,02	0,7	-
	Thifensulfuron-méthyle	4,3	143	-
Pomme	Acétamipride	0,1	1,1	-
	Phosmet	1,3	11	-
	Spinétorame	0,1	0,5	-
	Thiaclopride	0,7	3,3	-
	Captane	3,0	40	13
	Mancozèbe	0,01	0,1	-
	Métiram	0,3	4,6	-
	Sulfate de streptomycine	1,9	44	-

5.3 Impact des mesures d'adaptation

Chaque mesure d'adaptation a été testée sur un seul ingrédient actif afin de limiter le temps de calcul (Tableau 6, Section 4.2.3). Pour chaque site, 2 300 (23 simulations climatiques x 100 réalisations) séries de 60 ans (1981-2040) sont simulées. L'impact de l'adaptation est évalué à partir de la différence entre les charges totales sur 30 ans des simulations avec adaptation et des simulations de référence (sans adaptation). Cet impact est mis en relation avec l'impact des changements climatiques, évalué à partir des différences moyennes

sur 30 ans des simulations avec adaptation et de référence. Le niveau de confiance de l'impact de l'adaptation est évalué, pour chaque site, à partir de la variabilité inter-réalisations et de la variabilité inter-simulations climatiques. Il est à noter qu'aucune des mesures testées ne peut être appliquée pour les fongicides et bactéricides considérés dans ce projet.

5.3.1 Non-application la veille d'une pluie

Pour les simulations de référence, les applications d'herbicides et d'insecticides ne pouvaient avoir lieu s'il tombait plus d'un millimètre de pluie durant la journée ciblée. La présente mesure consiste à ajouter une contrainte, soit de ne pas effectuer d'application si plus d'un millimètre de pluie est prévu le lendemain de la journée ciblée. Il faut faire l'hypothèse que le producteur est disposé à réduire sa fenêtre d'application, avec les risques qui peuvent en découler. Cette mesure ne pourrait pas nécessairement être appliquée aussi strictement en pratique, étant donné l'importance de traiter les cultures au bon moment, même dans le cas des herbicides (D. Bernier, MAPAQ, communication personnelle). Elle ne pourrait tout simplement pas être appliquée pour les fongicides et bactéricides, étant donné que les traitements ont souvent lieu lorsque les conditions sont humides. Néanmoins, cette mesure permet d'évaluer l'importance du délai sur le transport de pesticides dans l'eau de ruissellement. Elle est évaluée ici pour le phosmet, insecticide utilisé pour la pomme.

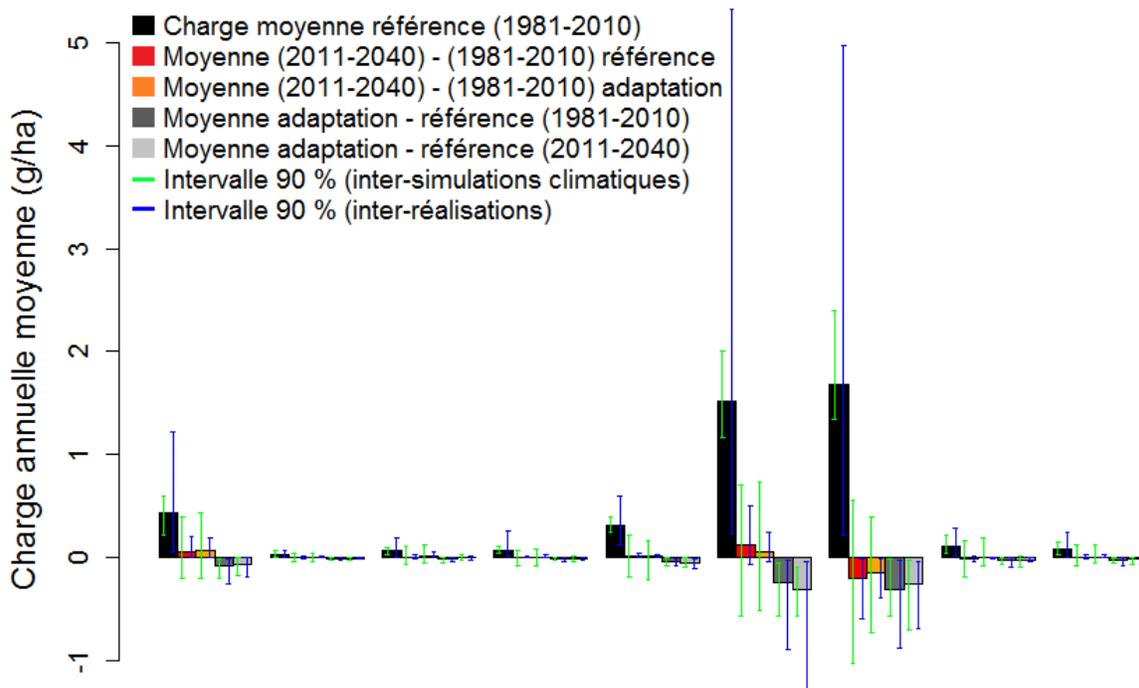


Figure 12. Impacts de la mesure d'adaptation (non-application la veille d'une pluie) et des changements climatiques sur la charge de phosmet transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement, évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les neuf sites simulés.

La Figure 12 présente la charge annuelle moyenne transportée sous forme dissoute pour le passé (1981-2010) ainsi que les effets de la mesure d'adaptation et des changements climatiques pour les neuf sites simulés. Ces résultats sont accompagnés des intervalles 90 % inter-simulations climatiques et inter-réalisations. Il est à noter que les résultats obtenus pour la charge annuelle moyenne adsorbée aux particules de sol érodées suivent la même tendance, mais les valeurs sont plus petites (résultats non présentés).

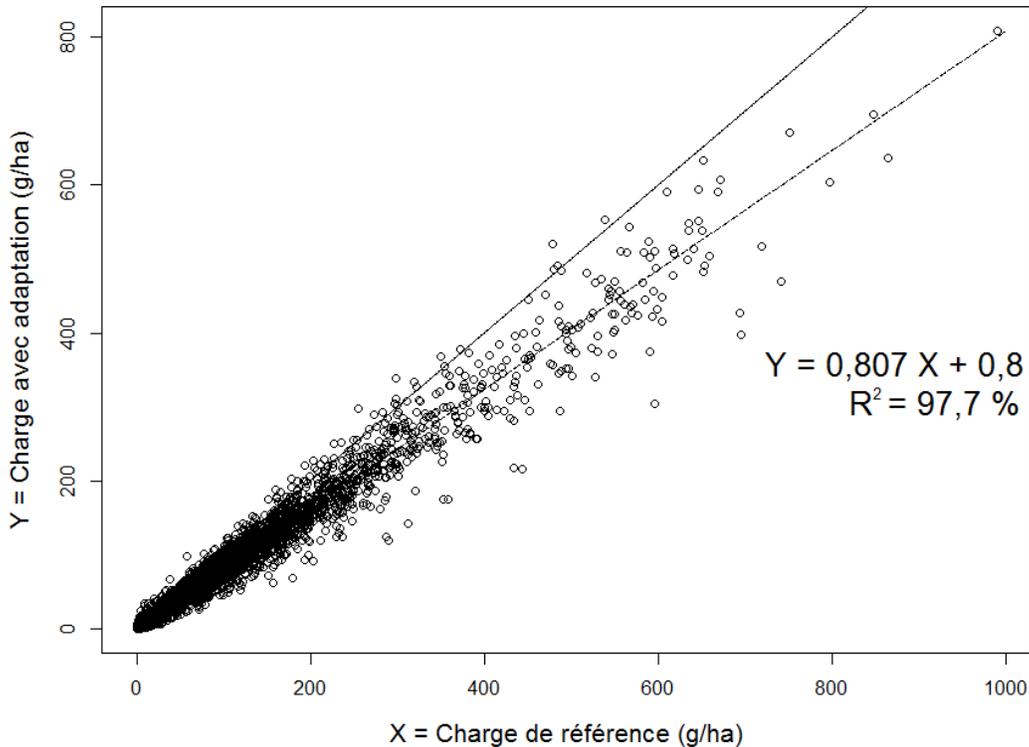


Figure 13. Charge totale (1981-2040) de phosmet transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement des simulations avec et sans adaptation pour les 20 700 combinaisons site/simulation climatique/réalisation. La ligne pleine est la droite $Y = X$ et la ligne hachurée est la droite de régression.

L'impact de la mesure d'adaptation est significatif pour les sites ayant les plus fortes charges transportées. Cela suggère que pour les sites ayant les plus fortes charges transportées pour les simulations de référence, il y a eu au moins un événement de pluie important le lendemain d'une application. En comparant les charges totales sur 60 ans des simulations avec et sans adaptation pour toutes les combinaisons site/simulation climatique/réalisation, la charge avec adaptation est diminuée d'environ 20 % en moyenne (Figure 13). Cette diminution correspond à peu près au taux de dégradation journalier du phosmet utilisé dans toutes les simulations, soit $\ln(2)/\text{demi-vie} = \ln(2)/3,1 \text{ jours} = 22 \% / \text{jour}$ (Annexe A).

Ainsi, dans les cas où la majeure partie de la charge totale transportée provient d'événements de pluie survenus le lendemain du traitement, la diminution causée par cette mesure d'adaptation devrait être approximativement égale à $\ln(2)/\text{demi-vie}$ à long terme. Selon toute vraisemblance,

cela devrait être le cas pour les ingrédients actifs ayant une demi-vie relativement courte. Pour les ingrédients actifs ayant une longue demi-vie, la diminution devrait être moindre, étant donné que les événements de pluie intenses peuvent transporter une grande charge de pesticides, même s'ils surviennent plusieurs jours après le traitement. Quoi qu'il en soit, à l'échelle journalière, toutes choses égales d'ailleurs, l'augmentation d'une journée du délai entre le traitement et la pluie provoquera une diminution de la charge transportée approximativement égale au taux de dégradation journalier de l'ingrédient actif. Cela illustre l'importance d'utiliser des produits moins persistants et d'avoir un long délai entre le traitement et la prochaine pluie, lorsque cela est possible. Ce constat est vrai, en dépit des changements climatiques.

5.3.2 Variation du seuil de pluie

Dans cette section, la sensibilité des charges transportées à la valeur seuil de précipitation définie pour les applications d'herbicides et d'insecticides est analysée. Pour les simulations de référence, les applications d'herbicides et d'insecticides sont permises uniquement si la précipitation cumulée durant le jour prévu est inférieure à 1 mm. Des seuils de 0,1 et de 5 mm ont été testés pour le phosmet (pomme) sur neuf sites. La valeur de 0,1 mm correspond pratiquement à une précipitation nulle et la valeur de 5 mm est une valeur au-delà de laquelle il est peu probable qu'un producteur procède à une application.

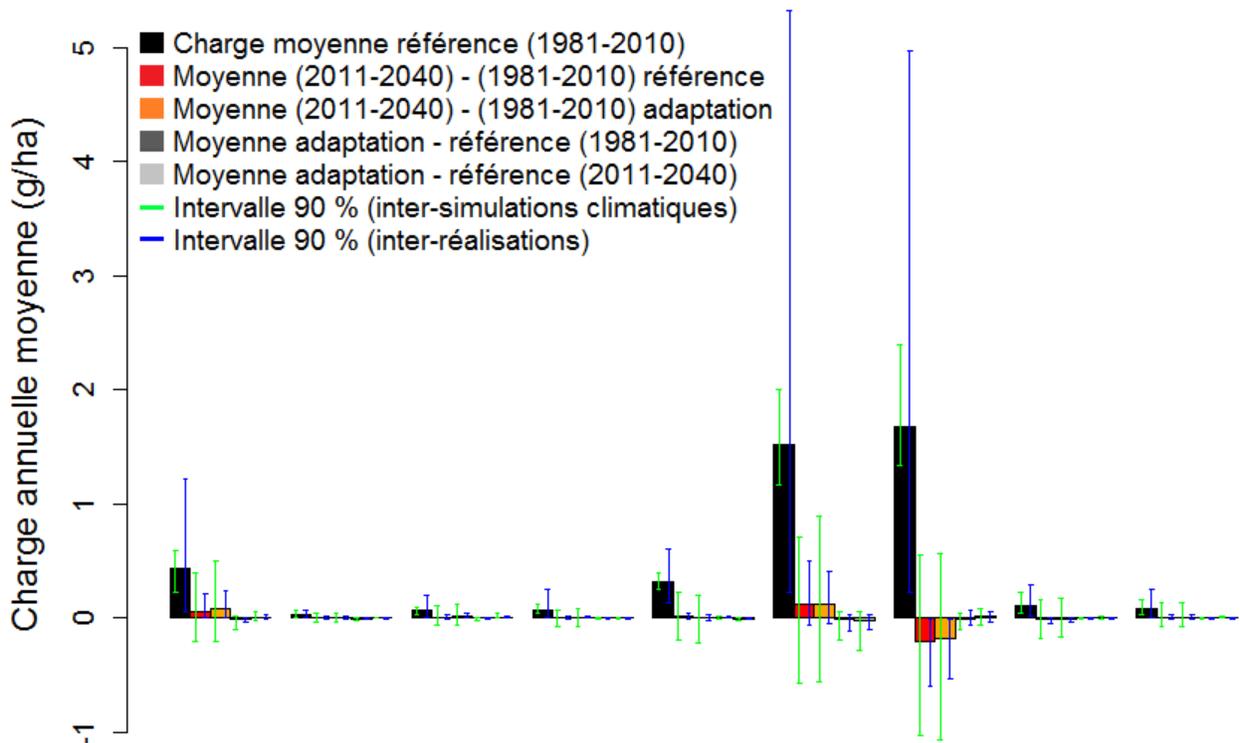


Figure 14. Impacts de la mesure d'adaptation (abaissement du seuil de pluie de 1 à 0,1 mm) et des changements climatiques sur la charge de phosmet transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement, évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les neuf sites simulés.

La Figure 14 indique que l'abaissement du seuil de 1 à 0,1 mm n'a pratiquement aucun effet sur la charge totale transportée sous forme dissoute. Les résultats sont semblables pour la forme adsorbée (non présentés). Il faut prendre en compte que le seuil de référence (1 mm) est déjà contraignant. Or, le fait d'augmenter le seuil à 5 mm n'a pas d'effet notable non plus (Figure 15). Cela illustre que ce sont principalement les événements de précipitation intense qui contribuent à la charge totale. Le producteur devrait essayer de les éviter, dans la mesure où cela est possible.

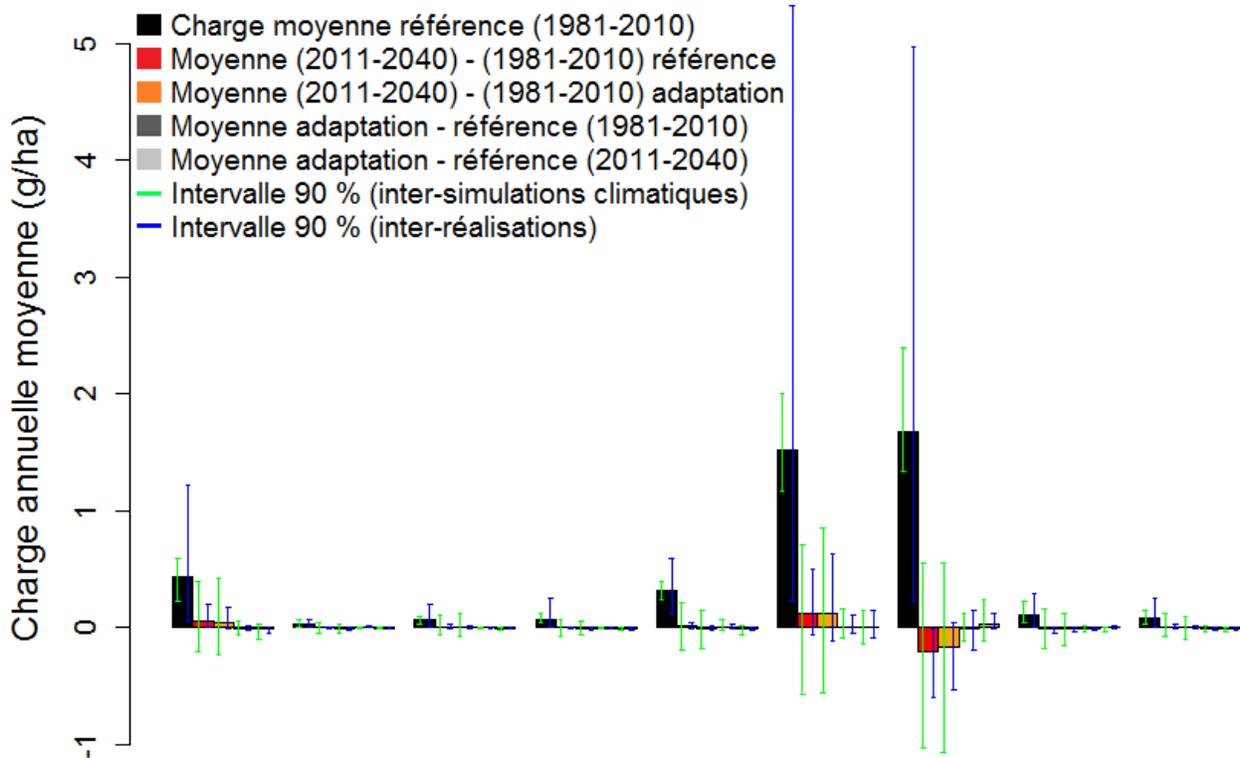


Figure 15. Impacts de la mesure d'adaptation (élévation du seuil de pluie de 1 à 5 mm) et des changements climatiques sur la charge de phosmet transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement, évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les neuf sites simulés.

5.3.3 Travail réduit du sol

Le travail réduit consiste en une diminution du travail du sol par rapport au travail classique. Il est difficile de définir exactement la nature et l'impact du travail réduit, car il comprend un grand éventail de pratiques et que sa définition même évolue dans le temps : une pratique que l'on qualifiait de travail réduit dans le passé pourrait maintenant être qualifiée de travail classique (AAC, 2014). Dans la présente section, on a considéré que le travail réduit se traduisait par une diminution du *curve number* (CN; Annexe E) de 2 % (Tableau 5.13; Suarez, 2005) pour toute l'année, une diminution du facteur C de l'équation d'érosion (USLEC; Annexe E) d'environ 13 % sur l'ensemble de l'année (Wall *et al.*, 2002) et une diminution du coefficient de rugosité de Manning (MNGN; Annexe E; voir Tableau 5.46 de Suarez, 2005). Cependant, étant donné que le travail réduit laisse plus de graines de mauvaises herbes dans les premiers centimètres de

sol que le travail classique (Douville, 2002), cette adaptation nécessite une application supplémentaire de glyphosate en présemis. Le taux de cette application pour un champ de maïs varie de 0,27 à 5,76 kg/ha (SAGe pesticides, 2014), et on a supposé qu'elle avait lieu dans les cinq jours précédant le semis. L'adaptation a été testée pour le maïs résistant au glyphosate. Pour toutes les simulations, avec ou sans adaptation, une application de glyphosate a été simulée en postlevée pour du maïs résistant au glyphosate à un taux variant de 0,9 à 1,8 kg/ha (Tableau 3, Section 4.2.2), ce taux étant généralement inférieur à celui supposé en présemis pour l'adaptation.

La Figure 16 présente la charge annuelle moyenne transportée sous forme dissoute pour le passé (1981-2010) ainsi que les effets de la mesure d'adaptation et des changements climatiques pour les dix sites simulés, accompagnés des intervalles 90 % inter-simulations climatiques et inter-réalisations.

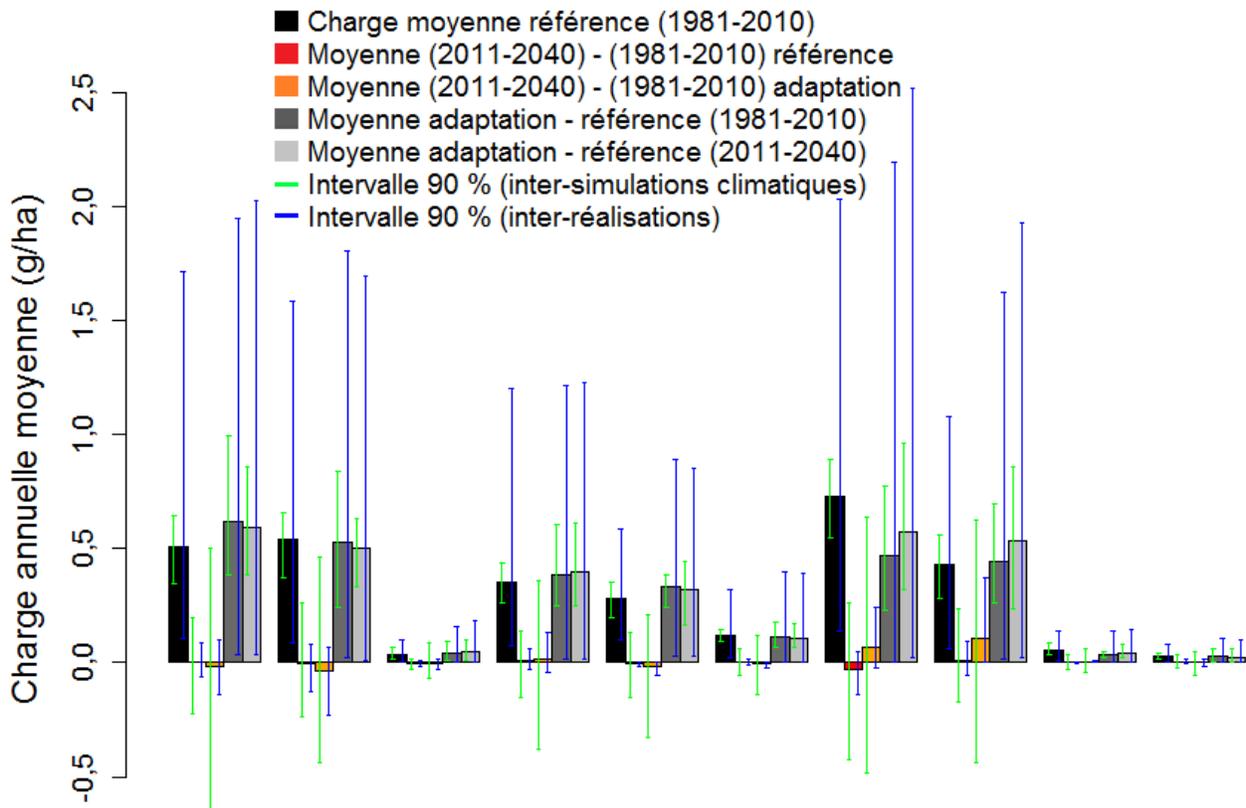


Figure 16. Impacts de la mesure d'adaptation (travail réduit du sol) et des changements climatiques sur la charge de glyphosate transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement, évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les dix sites simulés.

Les résultats indiquent que la charge moyenne transportée pour les simulations avec travail réduit du sol est environ le double de celle obtenue pour les simulations de référence (travail classique). Cette augmentation est significative. Les charges transportées sous forme adsorbée (non présentées) varient significativement d'un site à l'autre, mais comme pour la forme

dissoute, la charge moyenne transportée pour les simulations avec travail réduit du sol est environ le double de celle obtenue pour les simulations avec travail classique.

En moyenne, les pertes causées par le ruissellement (somme des formes dissoute et adsorbée) correspondent à 0,06 et à 0,09 % de ce qui est appliqué pour le travail réduit et le travail classique du sol, respectivement. Le travail réduit du sol permet donc de diminuer la perte de façon relative, mais l'application supplémentaire de glyphosate requise en début de saison fait en sorte que la charge totale transportée augmente.

5.3.4 Semis direct

Cette adaptation consiste à ne faire aucun travail du sol à l'automne. Dans les paramètres du PRZM, cela se traduit par une diminution du *curve number* (CN; Annexe E) de 4 % (Tableau 5.13; Suarez, 2005) pour toute l'année, une diminution du facteur C de l'équation d'érosion (USLEC; Annexe E) variant d'environ 40 % pour le blé et le maïs à environ 60 % pour le soya sur l'ensemble de l'année (Wall *et al.*, 2002) et une diminution du coefficient de rugosité de Manning (MNGN; Annexe E; voir Tableau 5.46 de Suarez, 2005). Comme pour le travail réduit (Section 5.4.3), il on a supposé que cette adaptation nécessitait une application supplémentaire de glyphosate dans les cinq jours précédant le semis à un taux variant de 0,27 à 5,76 kg/ha (SAGe pesticides, 2014). Encore une fois, l'adaptation a été testée pour le maïs résistant au glyphosate, et une application de glyphosate est supposée être nécessaire en postlevée pour toutes les simulations, avec ou sans adaptation, à un taux variant de 0,9 à 1,8 kg/ha (Tableau 3, Section 4.2.2). Les dix mêmes sites que ceux considérés pour le travail réduit (Section 5.3.3) ont été analysés.

Comme pour le travail réduit du sol, le semis direct mène à une augmentation moyenne des charges totales transportées sous forme dissoute, mais cette augmentation est plus faible et n'est plus significative compte tenu de la variabilité inter-réalisations (Figure 17). L'impact simulé du semis direct est plus fort sur les charges transportées sous forme adsorbée, même que les différences entre le semis direct et le travail classique du sol sont négligeables (non présentées). Cela est causé par la grande diminution du paramètre USLEC (Annexe E). En moyenne, les pertes totales causées par le ruissellement (somme des formes dissoute et adsorbée) correspondent à 0,03 % de ce qui est appliqué pour le semis direct, comparativement à 0,09 % pour le travail classique du sol.

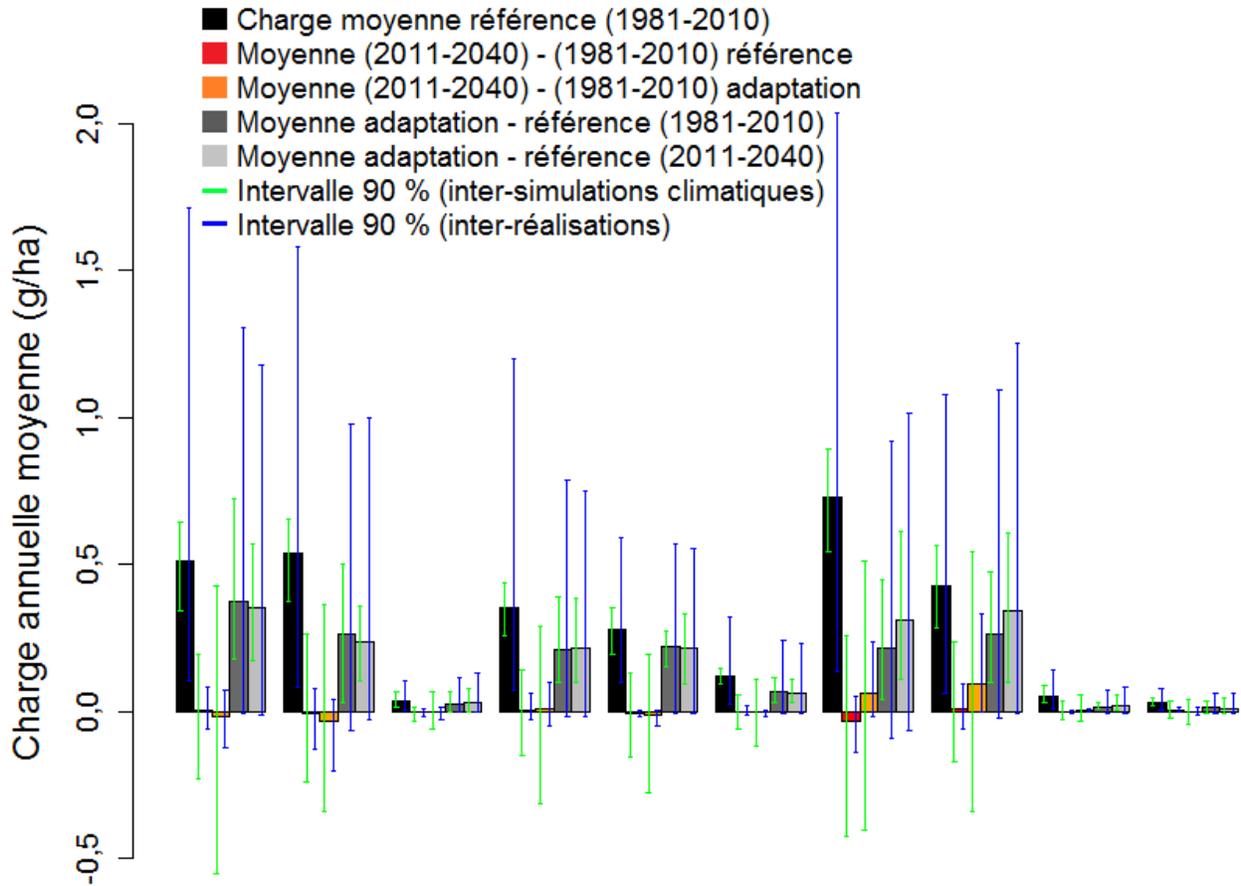


Figure 17. Impacts de la mesure d'adaptation (semis direct) et des changements climatiques sur la charge de glyphosate transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement, évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les dix sites simulés.

5.3.5 Incorporation dans le sol

Pour toutes les simulations faites jusqu'à maintenant, on a supposé que le pesticide était pulvérisé et que l'interception foliaire était proportionnelle à la surface du sol couverte par la culture. Ce qui atteint la surface du sol s'infiltré et la concentration du pesticide dans le sol décroît linéairement jusqu'à une profondeur donnée par le paramètre DEPI (Annexe E). Pour l'incorporation dans le sol, la concentration est maximale à la profondeur DEPI et décroît linéairement jusqu'à la surface du sol. Peu d'ingrédients actifs vendus commercialement peuvent être incorporés. L'atrazine est le seul ingrédient actif considéré dans ce projet qui peut être incorporé.

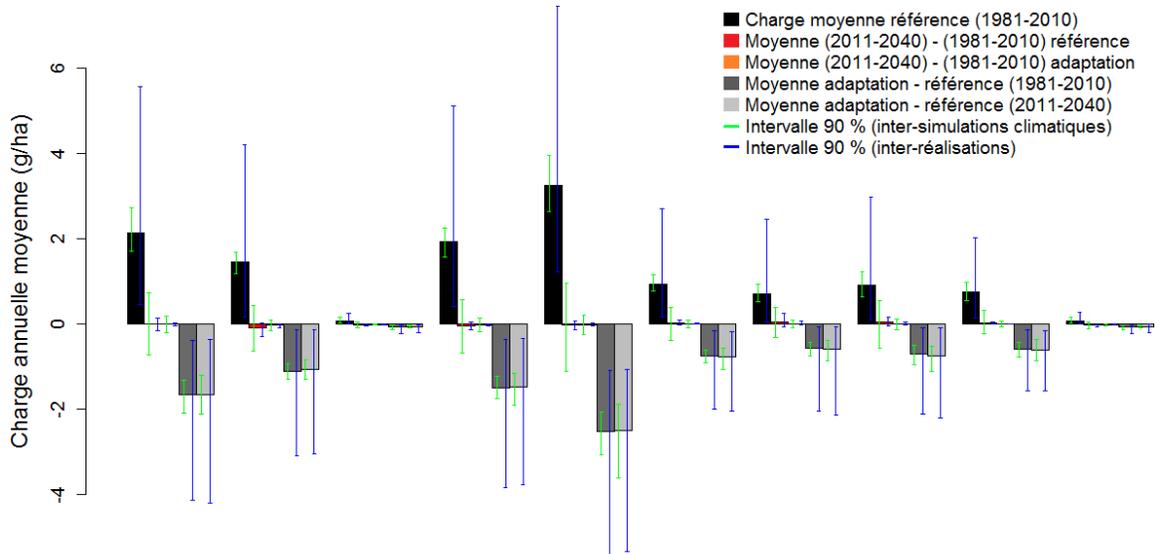


Figure 18. Impacts de la mesure d'adaptation (incorporation dans le sol) et des changements climatiques sur la charge d'atrazine transportée sous forme dissoute dans l'eau de ruissellement, évalués sur les moyennes sur 30 ans pour les dix sites simulés.

Avec l'incorporation, la charge totale sur 60 ans sous forme dissoute diminue significativement en moyenne d'environ 75 %, peu importe le site retenu (Figure 18). L'incorporation réduit presque totalement la charge sous forme adsorbée, avec une diminution de 98 % en moyenne. L'impact exact varie d'une réalisation à l'autre par l'entremise du paramètre DEPI. La distribution choisie pour DEPI est une normale d'espérance 4 cm et d'écart-type 1 cm (Annexe E). La réalisation avec la plus petite valeur de DEPI (1,4 cm) donne une diminution de la charge moyenne de 20 %, celle avec la valeur médiane de DEPI (4,1 cm) donne une diminution de 84 % et celle avec la plus grande valeur de DEPI (6,4 cm) donne une diminution de 92 %. Cette diminution non linéaire peut s'expliquer à partir de l'équation du PRZM définissant $I(z)$, la proportion des pesticides contenus sous forme dissoute dans le sol qui est disponible pour le mélange avec l'eau de ruissellement (Suarez, 2005; p. 200) :

$$I(z) = 0,7 \left(\frac{1}{2z + 0,9} \right)^2 \quad (1)$$

où z est la profondeur du sol et est inférieur ou égal à 2 cm. Cette proportion décroît rapidement avec la profondeur, et les pesticides qui se trouvent à des profondeurs au-delà de 2 cm ne sont pas accessibles pour le ruissellement. En somme, la valeur exacte de l'impact de l'incorporation dans le sol dépend essentiellement de l'Équation (1), de la profondeur d'infiltration après pulvérisation et de la profondeur d'application pour les incorporations. Dans les simulations, ces deux profondeurs sont supposées égales à DEPI. Quoi qu'il en soit, le fait est que la charge transportée diminuera avec la profondeur d'incorporation. Il est à noter que l'atrazine peut être

appliqué plus profondément (10 cm), ce qui augmente l'impact bénéfique de l'incorporation sur la charge transportée dans l'eau de ruissellement.

6 Conclusion

L'objectif général du projet était de prédire l'impact des changements climatiques sur l'évolution de la contamination de l'eau de ruissellement de surface par les produits phytosanitaires durant la période 1981-2040 pour certains ennemis des cultures de blé, de maïs, de soya et de pomme (Section 2). Une méthodologie intégrant les interactions et les incertitudes liées aux différents processus physiques et chimiques a été élaborée (Section 4). Des simulations ont été réalisées sur 28 sites québécois à partir de températures et de précipitations journalières mises à l'échelle provenant de 23 simulations climatiques, de modèles du logiciel bioclimatique CIPRA (Plouffe *et al.*, 2014) et du modèle de transport des pesticides PRZM version 3.12.3 (Suarez, 2005). Les valeurs des paramètres du modèle PRZM ont été sélectionnées selon la méthode de Monte-Carlo pour tenir compte de l'incertitude liée à leur estimation. Au total, 21 ingrédients actifs ont été considérés. Pour chaque combinaison site/ingrédient actif/simulation climatique, 100 séries journalières de 60 ans (1941-2040) ont été générées.

6.1 Résumé des constats

Les résultats obtenus visaient à répondre à deux objectifs spécifiques, soit l'estimation objective de l'impact des changements climatiques et de l'impact de mesures d'adaptation sur la contamination de l'eau de ruissellement par les pesticides durant la période 1981-2040 pour les combinaisons cultures-ennemis retenues.

6.1.1 Évolution des variables climatiques pertinentes

Le cumul des degrés-jours augmente de 1981 à 2040 pour l'ensemble des simulations climatiques utilisées sur les sites étudiés. Il en résulte un devancement des dates d'application d'herbicides et d'insecticides simulées. Les applications durant la période 2011-2040 sont devancées en moyenne d'environ trois jours par rapport à la période 1981-2010 pour les applications d'herbicides en début de saison (Figure 2, Section 5.1.1) et d'environ huit jours pour les applications d'insecticides pour la pomme en fin de saison (Figure 3, Section 5.1.1). Le devancement moyen des applications d'insecticides en fin de saison atteint 10 jours pour les deux vergers les plus éloignés de Montréal (Figure 1).

Il n'y a pas d'impact clair des changements climatiques sur les précipitations moyennes et maximales journalières durant la fenêtre d'application sur les sites et la période étudiés (Tableaux 7 et 9; sections 5.1.3 et 5.1.4). Il y a trois éléments importants pouvant expliquer cela. Premièrement, la période étudiée (1981-2040) est relativement courte d'un point de vue climatique. Des séries plus longues (p. ex., 1961-2100, soit la période couverte par chaque simulation climatique) auraient vraisemblablement permis de détecter plus de changements, puisque le climat devrait continuer à changer jusqu'en 2100 (surtout pour le scénario A2; GIEC,

2007). En outre, d'un point de vue statistique, une série plus longue augmente la puissance du test, c'est-à-dire qu'elle permet de détecter plus facilement une tendance, lorsqu'il y en a une. Deuxièmement, la grande variabilité naturelle de la précipitation, surtout pour les événements extrêmes, peut masquer l'impact des changements climatiques (CEHQ, 2013; Gagnon et Rousseau, 2014). Troisièmement, le fait que la fenêtre d'application varie d'une année à l'autre en fonction de la météo représente une forme d'adaptation aux changements climatiques. Ce dernier élément est le moins important des trois, la précipitation journalière étant stable durant 60 ans pour la majorité des sites et des simulations climatiques (Tableaux 7 à 10 et Figures 7 et 8; sections 5.1.3 et 5.1.4).

La précipitation influe aussi sur les applications de fongicides contre la tavelure en ayant une incidence sur le nombre d'heures de mouillure des feuilles du pommier et indirectement sur le nombre de jours sans pluie. Une légère hausse moyenne de 0,1 application de fongicides par saison entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040 a été obtenue des simulations. Cette augmentation est non significative d'un point de vue statistique. Le nombre d'applications saisonnières de bactéricides contre le feu bactérien (pommier), qui dépend essentiellement de la température, mais sur une très courte période, demeure stable durant la période 1981-2040.

6.1.2 Évolution des charges transportées

Dans l'ensemble, les charges annuelles transportées sous formes dissoute et adsorbée demeurent stables durant la période 1981-2040. Les trois ingrédients actifs utilisés contre la tavelure du pommier représentent la seule exception, avec environ 60 % de tendances positives, mais peu d'entre elles sont statistiquement significatives (Figures 9 et 11; sections 5.2.1 et 5.2.2). Dans l'absolu, la charge transportée de ces trois ingrédients augmente d'environ 10 % en moyenne entre les périodes 1981-2010 et 2011-2040. Les charges transportées d'atrazine et de mésotrione, deux ingrédients actifs appliqués en prélevée pour le maïs, sont à la hausse dans respectivement 52,8 et 52,7 % des cas seulement, malgré une tendance à la hausse des pluies maximales journalières dans 63,5 % des cas (Tableau 7; Section 5.1.3). En moyenne, pour l'ensemble des ingrédients actifs, plus de 85 % de la charge totale transportée sur 60 ans provient des charges maximales annuelles journalières. Ces charges maximales annuelles sont généralement générées par des événements de pluie intense survenus peu de temps après l'application de pesticides. Or, comme l'indiquent les diagrammes en boîtes des moyennes par simulation climatique (Figures 9 et 11), la variabilité naturelle de ces événements de pluie est très grande, ce qui masque l'impact des changements climatiques, s'il y en a un, sur la charge transportée durant la période 1981-2040.

Pour un ennemi donné, l'impact du climat sur la charge transportée varie très peu selon le site, l'ingrédient actif et la réalisation. Ces trois facteurs influent grandement sur la charge transportée dans l'absolu, mais n'influent pas ou influent très peu sur l'impact du climat sur la charge transportée, de façon relative.

Il est à noter que dans les scénarios d'application proposés (Section 4.2.2), le producteur effectue des applications de manière raisonnée et parvient à éliminer efficacement les risques associés aux ennemis des cultures. Dans le cas contraire, par exemple si plusieurs applications d'herbicides s'avèrent nécessaires ou si le producteur doit effectuer plusieurs applications pour contrer les infections de type II de la tavelure du pommier, l'impact des changements climatiques pourrait être supérieur.

6.1.3 Impact des mesures d'adaptation

Des mesures pouvant réduire les charges transportées à l'échelle du champ ont été simulées (Tableau 6, Section 4.2.3). Les deux premières mesures présentées, soit la non-application la veille d'une pluie et la variation du seuil de pluie pour les applications, ont illustré que ce sont essentiellement les événements de pluie intense survenant peu de temps après l'application de pesticides qui sont importants à éviter. L'augmentation du délai entre une application et une forte pluie est bénéfique, surtout dans le cas des ingrédients actifs peu persistants.

L'impact simulé du travail réduit du sol et du semis direct est mitigé. Alors que la proportion de la masse totale de pesticides appliquée qui est transportée dans l'eau de ruissellement diminue pour les deux mesures d'adaptation, la charge totale transportée, dans l'absolu, augmente. Il y a deux éléments importants à considérer pour l'évaluation de la portée de ces résultats. Premièrement, les ajustements recommandés des valeurs de certains paramètres du modèle PRZM pourraient ne pas permettre de tenir compte assez précisément des bienfaits des pratiques de gestion (Miao *et al.*, 2004). Par exemple, le semis direct et, dans une certaine mesure, le travail réduit, augmentent le contenu en carbone organique à la surface du sol (Alletto *et al.*, 2010), mais cet effet n'est pas considéré dans le modèle. Deuxièmement, le travail réduit et le semis direct ont un impact sur le ruissellement de surface et sur d'autres variables de qualité de l'eau. Une évaluation complète de ces mesures devrait inclure leurs impacts sur l'ensemble de ces variables.

L'incorporation de l'atrazine dans le sol réduit significativement la perte par ruissellement par rapport à la pulvérisation en surface. Il y a une certaine variabilité quant à la valeur exacte de la diminution de la charge transportée causée par l'incorporation. Néanmoins, les diminutions moyennes sont de l'ordre de 75 % et 98 % pour les formes dissoute et adsorbée, respectivement, selon des scénarios prudents (*i. e.*, incorporations peu profondes).

6.2 Limitations

Les constats sont valides uniquement pour les ennemis des cultures considérés (Section 2). La phénologie des cultures et de leurs ennemis dépend du climat, et les dates d'application de pesticides ont été générées en conséquence. Par contre, l'abondance de l'ennemi n'a pas été considérée; la dose par application était la même d'une année à l'autre pour une simulation donnée. L'impact des changements climatiques pourrait différer pour d'autres maladies ou

insectes ravageurs qui sont déjà problématiques au Québec. Les changements climatiques pourraient également provoquer l'arrivée de nouveaux ennemis, qui n'ont pas été considérés. La résistance possible des ennemis à certains ingrédients actifs (Bloomfield *et al.*, 2006; Lethmayer *et al.*, 2009; Hakala *et al.*, 2011), l'impact de la rotation des cultures et les effets de la température et des traitements de l'année précédente sur l'abondance des insectes ravageurs (Rafoss et Saethre, 2003; Gagnon *et al.*, 2013) n'ont pu être considérés.

Les analyses ont été faites sur la période 1981-2040, en supposant que les pratiques agricoles non directement liées au climat demeuraient inchangées. Le choix de cette période a été motivé par le fait que les pratiques agricoles, notamment l'utilisation des produits phytosanitaires, évoluent rapidement et qu'une évaluation au-delà de 2040 est peu réaliste. L'impact des changements climatiques aurait vraisemblablement été plus grand si la période à l'étude avait été plus longue. De plus, l'évolution du climat n'étant pas uniforme à la grandeur du globe, les résultats ne peuvent être directement transposés à d'autres régions.

Des développements technologiques liés aux pratiques phytosanitaires pourraient survenir dans les années et les décennies à venir et avoir un impact significatif, plus grand que l'impact des changements climatiques, sur la contamination de l'eau (Boxall *et al.*, 2009; Hakala *et al.*, 2011). Des percées comme de nouvelles méthodes d'application, de nouveaux cultivars résistants aux ennemis et de nouveaux ingrédients actifs moins toxiques, moins persistants et moins mobiles pourraient diminuer le risque de contamination de l'eau lié à l'utilisation des pesticides. En contrepartie, l'arrivée de nouveaux cultivars résistants à certains ingrédients actifs pourrait faire augmenter l'application de ces ingrédients actifs. Le risque de contamination augmentera si ces ingrédients actifs sont plus toxiques, plus persistants ou plus mobiles que ceux actuellement utilisés.

Il est supposé que l'ensemble des 23 simulations climatiques couvre le spectre possible de l'évolution du climat de 1981 à 2040. Les simulations se basent sur des scénarios d'évolution des émissions de GES élaborés il y a une quinzaine d'années (Nakicenovic et Swart, 2000). De nouvelles simulations avec de nouveaux scénarios pourraient donner des résultats différents. Ceci étant dit, le choix des scénarios d'émissions de GES est plus important pour les horizons plus lointains.

Les données climatiques peuvent être sensibles à la méthode de mise à l'échelle utilisée, dans le cas présent le *daily translation* (Mpelasoka et Chiew, 2009), surtout pour les extrêmes (Chen *et al.*, 2012; Sulis *et al.*, 2012). Les charges transportées dépendent fortement des événements extrêmes, les valeurs simulées dans l'absolu dépendent donc de la méthode de mise à l'échelle utilisée. Cependant, le test utilisé pour évaluer les tendances des précipitations et des charges transportées (Mann, 1945; Kendall, 1970) est non-paramétrique (*i. e.*, analyse les rangs au lieu des données brutes) et n'est donc pas sensible à la méthode de mise à l'échelle utilisée.

L'augmentation des températures pourrait aussi apporter une augmentation du nombre de pluies extrêmes de type convectif (Gagnon et Rousseau, 2014). Cette évolution pourrait augmenter les pluies extrêmes à l'échelle locale, mais n'est pas considérée lors de l'application de la mise à l'échelle statistique. Cependant, l'impact devrait être relativement faible, compte tenu de durée relativement courte de la période analysée (1981-2040).

Les trois principales sources d'incertitude en modélisation sont les données d'entrée, les paramètres du modèle et le modèle lui-même (Dubus *et al.*, 2003). Pour le transport des pesticides, les deux premières sources ont été considérées, mais un seul modèle a été utilisé (PRZM version 3.12.3; Suarez, 2005). Les résultats dépendent donc de la représentation des processus faite par ce modèle. Certains phénomènes n'ont pas été simulés, comme la dérive et les dépôts atmosphériques (Messing *et al.*, 2013). De plus, le pas de temps du modèle (journalier) ne permet pas une représentation précise de plusieurs processus importants. Ceci étant dit, le choix des valeurs des principaux paramètres du modèle est peut-être plus important que le choix du modèle de transport utilisé (Dann *et al.*, 2006). Or, les résultats ont montré que les valeurs des paramètres du PRZM n'influent pas ou influent très peu sur l'impact des changements climatiques sur la charge transportée, même si ces valeurs ont un impact considérable sur les charges transportées dans l'absolu.

Les propriétés des ingrédients actifs ont été considérés comme fixes. En réalité, le paramètre K_{oc} (Farenhorst *et al.*, 2009) et la demi-vie (Bloomfield *et al.*, 2006; Shymko *et al.*, 2011; Balbus *et al.*, 2013) varient selon les propriétés du sol, mais les interactions entre l'activité microbiologique et les sols sont méconnues (van den Burg *et al.*, 2012). La demi-vie peut aussi diminuer avec l'augmentation des températures, ce qui pourrait entraîner une diminution de la charge transportée dans l'avenir, à moins que cette dégradation plus rapide n'entraîne une augmentation du nombre d'applications (Bloomfield *et al.*, 2006). Le transport des métabolites dans l'eau n'a pas été considéré. Puisque, pour une culture donnée, l'évolution dans le temps des charges transportées simulées est comparable d'un ingrédient actif à l'autre (sections 5.2.1 et 5.2.2), on peut supposer que la charge transportée d'un métabolite suit la même évolution dans le temps que son ingrédient actif parent. Le transport et la toxicité des adjuvants n'ont pas été considérés non plus.

En somme, l'interaction entre le climat et de nombreux facteurs importants, comme les taux d'application de pesticides et le taux de dégradation des ingrédients actifs, demeure difficile à quantifier. Une meilleure connaissance scientifique de ces interactions permettrait une évaluation plus représentative et plus complète de l'impact des changements climatiques.

Finalement, l'évolution de la contamination a été évaluée à l'échelle du champ. Pour une évaluation de la contamination de l'eau en rivière, une modélisation à l'échelle du bassin versant devrait être effectuée. Une telle modélisation devrait tenir compte de l'impact de l'évolution de

l'occupation du territoire, qui pourrait être supérieur à celui des changements climatiques (Quilbé *et al.*, 2008; Boxall *et al.*, 2009; Poelmans *et al.*, 2011; Balbus *et al.*, 2013).

6.3 Recommandations

En dépit des limitations de l'étude, certaines recommandations peuvent être formulées. Ces recommandations visent à limiter le risque de contamination de l'eau par les produits phytosanitaires. Il est important de mentionner qu'elles ne tiennent pas compte des facteurs externes tels que les coûts et les risques financiers associés aux mesures à adopter.

Le principal impact des changements climatiques sur la charge transportée simulée concerne les applications contre la tavelure du pommier. Pour les trois ingrédients actifs considérés (captane, mancozèbe, métiram), la très légère augmentation moyenne du nombre d'applications simulées pourrait amener une augmentation de l'ordre de 10 % en moyenne de la charge transportée de fongicides pour les 30 prochaines années. Une attention particulière devrait être donnée aux régions où les applications sont déjà problématiques. Les trois ingrédients actifs considérés dans ce projet sont peu persistants, mais étant donné qu'ils sont souvent appliqués dans des conditions humides, de fortes concentrations peuvent survenir dans l'eau de ruissellement, dépassant les critères de qualité de l'eau (Tableau 13).

Les résultats de ce projet ont illustré l'importance des pluies et des débits forts sur la charge transportée. Des pratiques de gestions bénéfiques (PGB) peuvent être appliquées afin de réduire le ruissellement et l'érosion lors de ces événements. Deux mesures liées au travail du sol ont été analysées : le travail réduit du sol et le semis direct. Les résultats montrent que ces mesures réduisent la charge transportée par application, mais ne diminuent pas nécessairement la charge totale transportée, puisqu'une application supplémentaire est nécessaire en présemis. Bien que l'impact des mesures obtenu à partir de la modélisation comporte beaucoup d'incertitudes (Miao *et al.*, 2004), ces mesures peuvent s'avérer bénéfiques si l'ingrédient actif utilisé en prélevée ou en postlevée est plus toxique que celui utilisé en présemis. Il existe d'autres PGB ne nécessitant pas d'applications supplémentaires de pesticides, comme la restauration de bandes riveraines (Rousseau *et al.*, 2012) et les milieux humides artificiels (Lizotte *et al.*, 2012).

Quelques mesures peuvent être prises à l'échelle du champ ou du verger afin de diminuer la concentration et la charge de pesticides dans l'eau de ruissellement lors des événements de pluie importants. Lorsque cela est possible, le producteur devrait, par exemple :

- être à l'affut des conditions météorologiques afin d'éviter d'appliquer des produits trop peu de temps avant un événement de pluie important;
- utiliser des produits moins mobiles et moins persistants;
- utiliser des produits à incorporer dans le sol.

Ces mesures sont valides, que l'on soit dans un contexte de changements climatiques ou non.

Références

AAC, 2010 : Pédo-paysage du Canada version 3.2. [En ligne] <http://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/slc/v3.2/index.html> (consulté le 4 septembre 2014).

AAC, 2014 : La souplesse de la culture sans travail et de la culture à travail réduit du sol garantit la réussite à long terme. [En ligne] <http://www.agr.gc.ca/fra/science-et-innovation/pratiques-agricoles/sol-et-terre/gestion-des-sols/la-souplesse-de-la-culture-sans-travail-et-de-la-culture-a-travail-reduit-du-sol-garantit-la-reussite-a-long-terme/?id=1219778199286> (consulté le 13 novembre 2014).

Alletto, L., Y. Coquet, P. Benoit, D. Heddadj, et E. Barriuso, 2010 : Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 367-400.

Atlas agroclimatique du Québec, 2012 : Atlas agroclimatique du Québec - Un outil d'aide à la décision et de sensibilisation. [En ligne] http://dev.agrometeo.org/atlas/display_guide/Formules_atlas_agroclim_2012_v8.pdf (consulté le 17 février 2014).

Balbus, J.M., A.B.A. Boxall, R.A. Fenske, T.E. McKone, et L. Zeise, 2013 : Implications of global climate change for the assessment and management of human health risks of chemicals in the natural environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 32(1), 62-78.

Barrette, É., 2006 : Pesticides et eau souterraine : Prévenir la contamination en milieu agricole, Direction des politiques en milieu terrestre, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec (QC), 17 p.

Baskerville, G.L., et P. Emin, 1969 : Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. *Ecology*, 50(3), 514-517.

Bloomfield, J.P., R.J. Williams, D.C. Gooddy, J.N. Cape, et P. Guha, 2006 : Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater—a UK perspective. *Science of the Total Environment*, 369, 163–177.

Bootsma, A., S. Gameda, et D.W. McKenney, 2005 : Potential impacts of climate change on corn, soybeans and barley yields in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 85 (2), 345-357.

Bourgeois, G., A. Bourque, et G. Deaudelin, 2004 : Modelling the impact of climate change on disease incidence: a bioclimatic challenge. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 26, 284-290.

Boxall, A.B.A., A. Hardy, S. Beulke, T. Boucard, L. Burgin, P.D. Falloon, P.M. Haygarth, T. Hutchinson, R.S. Kovats, G. Leonardi, L.S. Levy, G. Nichols, S.A. Parsons, L. Potts, D. Stone,

- E. Topp, D.B. Turley, K. Walsh, E.M.H. Wellington, et R.J. Williams, 2009 : Impacts of climate change on indirect human exposure to pathogens and chemicals from agriculture. *Environmental Health Perspectives*, 117(4), 508-514.
- Burgoa, B., et R.D. Wauchop, 1995 : Pesticides in run-off and surface waters. Dans Roberts, T.R., et P.C. Kearney (éds) : *Environmental Behaviour of Agrochemicals*. John Wiley & Sons Chichester, UK, vol. 9, p. 221-255.
- Carbone, J.P., P.L. Havens, et W. Warren-Hicks, 2002 : Validation of pesticide root zone model 3.12: Employing uncertainty analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(8), 1578-1590.
- Carisse, O., et T. Jobin, 2006 : La tavelure du pommier : mieux comprendre pour mieux intervenir - Agriculture et Agroalimentaire Canada. [En ligne] www.agr.gc.ca/fra/science-et-innovation/publications-scientifiques-et-ressources/fiches-techniques/la-tavelure-du-pommier-mieux-comprendre-pour-mieux-intervenir (consulté le 13 février 2014).
- Caya, D., et R. Laprise, 1999 : A semi-implicit semi-lagrangian Regional Climate Model: The Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, 127, 341-362.
- CEHQ, 2013 : Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d’étéage et d’hydraulicité à l’horizon 2050. Québec (QC), 2013, 51 p.
- Cessna, A.J., C. Sheedy, A. Farenhorst, et D.A.R. McQueen, 2010 : Chapitre 15 Pesticides. Dans Eilers, W., R. MacKay, L. Graham, A. Lefebvre (éds) : *L’agriculture écologiquement durable au Canada : Série sur les indicateurs agroenvironnementaux — Rapport no 3*. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa (ON), Canada, p. 109-115.
- Chen, J., F.P. Brissette, et R. Leconte, 2012 : Downscaling of weather generator parameters to quantify hydrological impacts of climate change. *Climate Research*, 51, 185-200.
- Chidawanyika, F., et J.S. Terblanche, 2011 : Rapid thermal responses and thermal tolerance in adult codling moth *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Insect Physiology*, 57, 108-117.
- Dann, R.L., M.E. Close, R. Lee, et L. Pang, 2006 : Impact of data quality and model complexity on prediction of pesticide leaching. *Journal of Environmental Quality*, 35, 628-640.
- Dayyani, S., S.O. Prasher, A. Madani, et C.A. Madramootoo, 2012 : Impact of climate change on the hydrology and nitrogen pollution in a tile-drained agricultural watershed in eastern Canada. *Transactions of the ASABE*, 55(2), 389-401.

- de Elia, R., et H. Côté, 2010 : Climate and climate change sensitivity to model configuration in the Canadian RCM over North America. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(4), 325-339.
- Diós, N., K. Szenteleki , A. Ferenczy, G. Petrányi, et L. Hufnagel, 2010 : A climate profile indicator based comparative analysis of climate change scenarios with regard to maize (*Zea mays* L.) cultures. *Applied Ecology and Environmental Research*, 7(3), 199-214.
- Douville, Y., 2002 : Prévention des mauvaises herbes : grandes cultures. Technaflora, Bécancour (QC), 23 p.
- Dubus, I.G., et P.H.M. Janssen, 2003 : Issue of replicability in Monte Carlo modeling: A case study with a pesticide leaching model. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 22(12), 3081-3087.
- Dubus, I.G., C.D. Brown, et S. Beulke, 2003 : Sources of uncertainty in pesticide fate modelling. *Science of the Total Environment*, 317, 53-72.
- Duffy, B., B. Schoch, J. Vogelsanger, E. Holliger, et E. Moltmann, 2008 : Fire blight forecasting model optimization in a user-friendly online interface. *Acta Horticulturae*, 803, 77-82.
- Farenhorst, A., D.A.R. McQueen, I. Saiyed, C. Hilderbrand, S. Li, D.A. Lobb, P. Messing, T.E. Schumacher, S.K. Papiernik, et M.J. Lindstrom, 2009 : Variations in soil properties and herbicide sorption coefficients with depth in relation to PRZM (pesticide root zone model) calculations. *Geoderma*, 150, 267-277.
- Flato, G.M., G.J. Boer, W.G. Lee, N.A. McFarlane, D. Ramsden, M.C. Reader, et A.J. Weaver, 2000 : The Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis Global Coupled Model and its Climate. *Climate Dynamics*, 16, 451-467.
- Footprint, 2008 : Database containing complete PRZM parameterisation for FOOTPRINT soil, climate and crop scenarios. Project no. 022704 (SSP) [En ligne] http://www.eu-footprint.org/downloads/FOOTPRINT_DL20.pdf (consulté le 4 septembre 2014).
- Fortin, J.-P., R. Turcotte, S. Massicotte, R. Moussa, J. Fitzback, et J.-P. Villeneuve, 2001a : A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part I: Description of the model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2), 91-99.
- Fortin, J.-P., R. Turcotte, S. Massicotte, R. Moussa, et J. Fitzback, 2001b : A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 2: Application to the Chaudière watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2), 100-108.
- Foulon, É., 2013 : Détection de situations hydrologiques extrêmes à partir de variables météorologiques dans un contexte de changements climatiques. Rapport réalisé dans le cadre du

cours « EAU901 - Travail dirigé II », Institut National de la Recherche Scientifique, centre Eau Terre Environnement.

Gagnon, A.-È., G. Arsenault-Labrecque, G. Bourgeois, L. Bourdages, P. Grenier, et M. Roy, 2013 : Études de cas pour faciliter une gestion efficace des ennemis des cultures dans le contexte de l'augmentation des risques phytosanitaires liés aux changements climatiques. Ouranos, Rapport final projet no 550004-PXI. 183 p.

Gagnon, P., et A.N. Rousseau, 2014 : Stochastic spatial disaggregation of extreme precipitation to validate a Regional Climate Model and to evaluate climate change impacts over a small watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 1-10.

Gagnon, P., C. Sheedy, A. Farenhorst, D.A.R. McQueen, A.J. Cessna, et N. Newlands, 2014 : A coupled stochastic/deterministic model to estimate the evolution of the risk of water contamination by pesticides across Canada. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 10(3), 429-436.

GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et A. Reisinger]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.

GIEC, 2013 : Summary for Policymakers. Dans Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, et P.M. Midgley (éds) : Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 27 pages.

Giroux, I., et L. Pelletier, 2012 : Présence de pesticides dans l'eau au Québec : bilan dans quatre cours d'eau de zones en culture de maïs et de soya en 2008, 2009 et 2010, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-64159-9 (PDF), 46 p. et 3 annexes.

Gordon, H.B., L.D. Rotstayn, J.L. McGregor, M.R. Dix, E.A. Kowalczyk, S.P. O'Farrell, L.J. Waterman, A.C. Hirst, S.G. Wilson, M.A. Collier, M.A., I.G. Watterson, et T.I. Elliott, 2002 : The CSIRO Mk3 Climate System Model. CSIRO Atmospheric Research Technical Paper No. 60.

Gordon, H.B., S.P. O'Farrell, M.A. Collier, M.R. Dix, L. Rotstayn, E.A. Kowalczyk, T. Hirst, et I.G. Watterson, 2010 : The CSIRO Mk3.5 Climate Model. Centre for Australian Weather and Climate Research Technical Report No. 021.

- Hakala, K., A.O. Hannukkala, E. Huusela-Veistola, M. Jalli, et P. Peltonen-Sainio, 2011 : Pests and diseases in a changing climate: a major challenge for Finnish crop production. *Agricultural and food science*, 20, 3-14.
- Hirschi, M., S. Stoeckli, M. Dubrovsky, C. Spirig, P. Calanca, M.W. Rotach, A.M. Fischer, B. Duffy, et J. Samietz, 2012 : Downscaling climate change scenarios for apple pest and disease modeling in Switzerland. *Earth System Dynamics*, 3, 33-47.
- Holt, E., R. Weber, G. Stevenson, et C. Gaus, 2010 : Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) impurities in pesticides: A neglected source of contemporary relevance. *Environmental Science & Technology*, 44, 5409-5415.
- Hopkinson, R.F., D.W. McKenney, E.J. Milewska, M.F. Hutchinson, P. Papadopol, et L.A. Vincent, 2011. Impact of Aligning Climatological Day on Gridding Daily Maximum-Minimum Temperature and Precipitation over Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 1654-1665.
- Hunsche, M., L. Damerow, M. Schmitz-Eiberger, et G. Noga, 2007 : Mancozeb wash-off from apple seedlings by simulated rainfall as affected by drying time of fungicide deposit and rain characteristics. *Crop protection*, 26, 768-774.
- Hutchinson, M.F., D.W. McKenney, K. Lawrence, J.H. Pedlar, R.F. Hopkinson, E.J. Milewska, et P. Papadopol, 2009 : Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum-Maximum Temperature and Precipitation for 1961-2003. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 725-741.
- IRDA, 2013 : Feuilles cartographiques. [En ligne] <http://www.irda.qc.ca/fr/outils-et-services/informations-sur-les-sols/etudes-pedologiques/feuilles-cartographiques/> (consulté le 4 septembre 2014).
- Jones, R.A.C., et M.J. Barbetti, 2012 : Influence of climate change on plant disease infections and epidemics caused by viruses and bacteria. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 7, art. no. 022.
- Jungclaus, J.H., M. Botzet, H. Haak, N. Keenlyside, J.-J. Luo, M. Latif, J. Marotzke, U. Mikolajewicz, et E. Roeckner, 2006 : Ocean circulation and tropical variability in the AOGCM ECHAM5/MPI-OM. *Journal of Climate*, 19(16), 3952-3972.
- Juszczak, R., L. Kuchar, J. Leśny, et J. Olejnik, 2013 : Climate change impact on development rates of the codling moth (*Cydia pomonella* L.) in the Wielkopolska region, Poland. *International Journal of Biometeorology*, 57, 31-44.

- Kattwinkel M., J.-V. Kühne, K. Foit, et M. Liess, 2011 : Climate change, agricultural insecticide exposure, and risk for freshwater communities. *Ecol Appl*, 21(6), 2068-2081.
- Kendall, M.G., 1970 : Rank Correlation Methods, 4^e éd., Griffin, Londres, G.-B.
- Koleva, N.G., et U.A. Schneider, 2010 : The impact of climate change on aquatic risk from agricultural pesticides in the US. *Int J Environ Stud*, 67(5), 677-704.
- Kondo, K., J. Boulange, T.K. Phong, K. Hiramatsu, T. Inoue, et H. Watanabe, 2012 : Probabilistic assessment of herbicide runoff from Japanese rice paddies: The effects of local meteorological conditions and site-specific water management. *Journal of Pesticide Science*, 37(4), 312-322.
- Lafrance, P., O. Banton, et F. Bernard Inc., 1996 : Évaluation environnementale des pratiques culturales sur maïs pour la réduction des pertes d'herbicides. Rapport de recherche INRS-Eau n° R-390 pour la Direction de l'information environnementale et de la recherche, ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. Rapport final en cinq volumes, 919 p.
- Lafrance, P., O. Banton, et P. Gagné, 1997 : Exportation saisonnière d'herbicides vers les cours d'eau mesurée sur six champs agricoles sous quelques pratiques culturales du maïs (Basses-Terres du St-Laurent). *Revue des Sciences de l'Eau*, 10(4), 439-459.
- Lawrence, M.G., 2005 : The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air - A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86, 225-233.
- Lethmayer, C., H. Hausdorf, J. Altenburger, et S. Blümel, 2009 : Trials of alternative codling moth (*Cydia pomonella*) control strategies in Austria. *International Journal of Fruit Science*, 9(4), 385-393.
- Lizotte Jr., R.E., F.D. Shields Jr., J.N. Murdock, R. Kröger, et S.S. Knight, 2012 : Mitigating agrichemicals from an artificial runoff event using a managed riverine wetland. *Science of the Total Environment*, 427-428, 373-381.
- Luedeling, E., K.P. Steinmann, M. Zhang, P.H. Brown, J. Grant, et E.H. Girevetz, 2011 : Climate change effects on walnut pests in California. *Global Change Biology*, 17, 228-238.
- Luo, Y., F. Spurlock, X. Deng, S. Gill, et K. Goh, 2011 : Use-Exposure Relationships of Pesticides for Aquatic Risk Assessment. *PLoS ONE*, 6(4), art. no. e18234.
- Mailhot, A., I. Beaugard, G. Talbot, D. Caya, et S. Biner, 2012 : Future changes in intense precipitation over Canada assessed from multi-model NARCCAP ensemble simulations. *International Journal of Climatology*, 32(8), 1151-1163.

- Mann, H.B., 1945 : Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13, 245-259.
- McQueen, D.A.R., A. Farenhorst, S. Allaire, et A.J. Cessna, 2007 : Automation and evaluation of three pesticide fate models for a national analysis of leaching risk in Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 87(2), 203-212.
- MDDELCC, 2002 : Critères de qualité de l'eau de surface. [En ligne] http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/index.asp (consulté le 2 mai 2014).
- Mearns, L.O., *et al.*, 2007 : *The North American Regional Climate Change Assessment Program dataset*, National Center for Atmospheric Research Earth System Grid Data Portal, Boulder, Colorado.
- Meehl, G.A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J.F.B. Mitchell, R.J. Stouffer, et K.E. Taylor, 2007 : The WCRP CMIP3 Multi-Model Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), 1383-1394.
- Messing, P., A. Farenhorst, D. Waite, et J. Sproull, 2013 : Influence of usage and chemical-physical properties on the atmospheric transport and deposition of pesticides to agricultural regions of Manitoba, Canada. *Chemosphere*, 90(6), 1997-2003.
- Miao, Z., A. Vicari, E. Capri, F. Ventura, L. Padovani, et M. Trevisan, 2004 : Modeling the Effects of Tillage Management Practices on Herbicide Runoff in Northern Italy. *Journal of Environmental Quality*, 33(5), 1720-1732.
- Mpelasoka, F.S., et F.H.S. Chiew, 2009 : Influence of Rainfall Scenario Construction Methods on Runoff Projections, *Journal of Hydrometeorology*, 10, 1168-1183.
- Nakicenovic, N., et R. Swart (éds.), 2000 : IPCC special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the IPCC. Cambridge, UK, 599 p.
- Nolan, B.T., I.G. Dubus, N. Surdyk, H.J. Fowler, A. Burton, J.M. Hollis, S. Reichenberger, et N.J. Jarvis, 2008 : Identification of key climatic factors regulating the transport of pesticides in leaching and to tile drains. *Pest Management Science*, 64, 933-944.
- OMAFRA, 2011 : La tavelure du pommier. [En ligne] <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/apscab.htm> (consulté le 22 mai 2014).
- Paquin, D., 2010 : Évaluation du MRCC4 en passé récent (1961-1999). Rapport interne No 15: Ouranos, Équipe Simulations climatiques.
- Plouffe, D., G. Bourgeois, N. Beaudry, G. Chouinard, et D. Choquette, 2014 : CIPRA - Centre Informatique de Prévision des Ravageurs en Agriculture. Agriculture et Agroalimentaire Canada,

Publication No. 12147F. 138 p. [En ligne]
http://www.agrireseau.qc.ca/documents/Document_88744.PDF (consulté le 8 décembre 2014).

Poelmans, L., A.V. Rompaey, V. Ntegeka, et P. Willems, 2011 : The relative impact of climate change and urban expansion on peak flows: a case study in central Belgium. *Hydrological Processes*, 25, 2846-2858.

Poirier, S.C., J.K. Whalen, et A.R. Michaud, 2012 : Bioavailable phosphorus in fine-sized sediments transported from agricultural fields. *Soil Science Society of America Journal*, 76, 258-267.

Quilbé, R., A.N. Rousseau, J.-S. Moquet, S. Savary, S. Ricard, et M.S. Garbouj, 2008 : Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 101-110.

Rafoss, T., et M.-G. Saethre, 2003 : Spatial and temporal distribution of bioclimatic potential for the Codling moth and the Colorado potato beetle in Norway: model predictions versus climate and field data from the 1990s. *Agricultural and Forest Entomology*, 5, 75-85.

Ressources Naturelles Canada, 2000 : Données numériques d'élévation du Canada (DNEC). [En ligne] <http://geogratis.gc.ca/api/fr/nrcan-rncan/ess-sst/3A537B2D-7058-FCED-8D0B-76452EC9D01F.html> (consulté le 30 mars 2015).

Rousseau, A.N., P. Lafrance, M.-P. Lavigne, S. Savary, B. Konan, R. Quilbé, P. Jiapizian, et M. Amrani, 2012 : A hydrological modeling framework for defining achievable performance standards for pesticides. *Journal of Environmental Quality*, 41, 52-63.

Sabbagh, G.J., R. Muñoz-Carpena, et G.A. Fox, 2013 : Distinct influence of filter strips on acute and chronic pesticide aquatic environmental exposure assessments across U.S. EPA scenarios. *Chemosphere*, 90, 195-202.

SAGÉ pesticides, 2014 : SAGÉ pesticides - Utilisation rationnelle des produits et traitements phytosanitaires contre ravageurs. [En ligne] <http://www.sagepesticides.qc.ca/> (consulté le 17 février 2014).

Scinocca, J. F., N.A. McFarlane, M. Lazare, J. Li, et D. Plummer, 2008 : Technical Note: The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 7055-7074.

Shymko, J.L., A. Farenhorst, et F. Zvomuya, 2011 : Polynomial response of 2,4-D mineralization to temperature in soils at varying soil moisture contents, slope positions and depths. *Journal of Environmental Science and Health Part B*, 46, 301-312.

Singh, P., et R.L. Jones, 2002 : Comparison of pesticide root zone model 3.12: runoff predictions with field data. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(8), 1545-1551.

Smith, T.J., 2010 : CougarBlight 2010. Washington State University Extension. [En ligne]. http://county.wsu.edu/chelan-douglas/agriculture/treefruit/Pages/Cougar_Blight_2010.aspx (consulté le 13 février 2014).

Steiner, P., 1990 : Predicting Apple Blossom Infections by *Erwinia amylovora* Using the Maryblyt Model. *Acta Horticulturae*, 273, 139-148.

Steiner, P., et G. Lightner, 1996 : Maryblyt 4.3. A predictive program for forecasting fire blight diseases in apples and pears. Gemplers Inc., Mt. Hebron, Wisconsin, 53572, USA.

Stensvand, A., D.M. Gadoury, T. Amundsen, L. Semb, et R.C. Seem, 1997 : Ascospore release and infection of apple leaves by conidia and ascospores of *Venturia inaequalis* at low temperatures. *Phytopathology*, 87(10): 1046-1053.

Stoekli, S., M. Hirschi, C. Spirig, P. Calanca, M.W. Rotach, et J. Samietz, 2012 : Impact of Climate Change on Voltinism and Prospective Diapause Induction of a Global Pest Insect – *Cydia pomonella* (L.). *PLoS ONE*, 7(4), art. no. e35723.

Stratonovitch, P., J. Storkey, et M.A. Semenov, 2012 : A process-based approach to modelling impacts of climate change on the damage niche of an agricultural weed. *Global Change Biology*, 18, 2071-2080.

Suarez, L.A., 2005 : PRZM-3, A model for predicting pesticide and nitrogen fate in the crop root and unsaturated soil zones: User's manual for release 3.12.2. EPA/600/R-05/111. Athens (GA), USA: U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Ecosystems Research Division. [En ligne] <http://www.epa.gov/athens/publications/reports/Suarez600R05111PRZM3.pdf> (consulté le 16 avril 2012).

Sulis, M., C. Paniconi, M. Marrocu, D. Huard, et D. Chaumont, 2012 : Hydrologic response to multimodel climate output using a physically based model of groundwater/surface water interactions, *Water Resources Research*, 48, W12510.

Tungate, K.D., D.W. Israel, D.M. Watson, et T.W. Rufty, 2007 : Potential changes in weed competitiveness in an agroecological system with elevated temperatures. *Environmental and Experimental Botany*, 60, 42-49.

Turcotte, R., A.N. Rousseau, J.-P. Fortin, et J.-P. Villeneuve, 2003 : Development of a process-oriented, multiple-objective, hydrological calibration strategy accounting for model structure. *Advances in Calibration of Watershed Models*, (Water Science & Application: no. 6). Dans

Duan, Q., S. Sorooshian, H. Gupta, A.N. Rousseau, et R. Turcotte (éds) : American Geophysical Union (AGU), Washington, USA. p. 153-163.

Université d'Hertfordshire. 2013. The Pesticide Properties DataBase (PPDB) developed by the Agriculture & Environment Research Unit (AERU), University of Hertfordshire, funded by UK national sources and through EU-funded projects, 2006-2013. [En ligne] <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm> (consulté le 20 février 2014).

USDA, Natural Resources Conservation Service (NRCS). 2004 : Chapter 9 - Hydrologic Soil-Cover Complexes. Dans National engineering handbook - Part 630, Hydrology. USDA NRCS. Washington (DC), USA. [En ligne] <http://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17758.wba> (consulté le 17 février 2014).

van den Berg, F., A. Tiktak, G.B.M. Heuvelink, S.L.G.E. Burgers, D.J. Brus, F. de Vries, J. Stolte, et J.G. Kroes, 2012 : Propagation of uncertainties in soil and pesticide properties to pesticide leaching. *Journal of Environmental Quality*, 41, 253-261.

van der Zwet, T., G. Lightner, J. Walter, et P. Steiner, 1990 : Comparison of the Maryblyt predictive model with the billing revised system for blossom blight risk assessment in apple. *Acta Horticulturae*, 273, 171-183.

Wall, G.J., D.R. Coote, E.A. Pringle, et I.J. Shelton (éds), 2002 : RUSLE-CAN — Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada. Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, No de la contribution AAC2244F, 117 p.

Warren-Hicks, W., J.P. Carbone, et P.L. Havens, 2002 : Using Monte Carlo techniques to judge model prediction accuracy: Validation of the Pesticide Root Zoot Model 3.12. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(8), 1570-1577.

Wauchope, R.D., 1978 : The pesticide content of surface water draining from agricultural fields – A review. *Journal of Environmental Quality*, 7(4), 459-472.

Wolfe, D.W., L. Ziska, C. Petzoldt, A. Seaman, L. Chase, et K. Hayhoe, 2008 : Projected change in climate thresholds in the Northeastern U.S.: implications for crops, pests, livestock, and farmers. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13, 555-575.

Wu, Y., et S. Liu, 2014 : Improvement of the R-SWAT-FME framework to support multiple variables and multi-objective functions. *Science of the Total Environment*, 466-467, 455-466.

Ziska, L.H., 2010 : Elevated carbon dioxide alters chemical management of Canada thistle in no-till soybean. *Field Crops Research*, 119, 299-303.

Ziska, L.H., 2013 : Observed changes in soyabean growth and seed yield from *Abutilon theophrasti* competition as a function of carbon dioxide concentration. *Weed Research*, 53, 140-145.

Annexes

Propriétés chimiques des ingrédients actifs

Propriétés chimiques des ingrédients actifs utilisés. Sauf indication contraire, les valeurs sont obtenues du Pesticide Properties Database (Hertfordshire (2013)).

Nom IUPAC	Nom commercial ^a	Demi-vie (j) ^b	K_{oc} (mL/g)	Constante d'Henry à 20°C (-)
(E)-N1-[(6-chloro-3-pyridyl)methyl]-N2-cyano-N1-methylacetamide	Assail 70 WP	3	200	$5,36 \cdot 10^{-12}$
6-chloro-N2-ethyl-N4-isopropyl-1,3,5-triazine-2,4-diamine	Atrazine 480	75	100	$1,20 \cdot 10^{-7}$
1-isopropyl-1H-2,1,3-benzothiadiazin-4(3H)-one 2,2-dioxide 3,5-dibromo-4-hydroxybenzotrile	Basagran	13	55,3	$2,00 \cdot 10^{-13}$
Pardner		1	302	$1,46 \cdot 10^{-7}$
N-(trichloromethylthio)cyclohex-4-ene-1,2-dicarboximide	Captan 4	0,8	200	$2,85 \cdot 10^{-7}$
3,6-dichloro-o-anisic acid	Banvel	4	3,45	$8,80 \cdot 10^{-8}$
2-[4-[(6-chloro-2-benzoxazolyl)oxy]-phenoxy]-propanoic acid	Excel Super	0,4	11354	$8,80 \cdot 10^{-9}$
N-(phosphonomethyl)glycine	Roundup	12	1435	$6,60 \cdot 10^{-19}$
ethyl-2-[(RS)-4-isopropyl-4-methyl-5-oxo-2-imidazolin-2-yl]nicotinic acid	Pursuit	90	52	$1,13 \cdot 10^{-9}$
manganese ethylenebis(dithiocarbamate) (polymeric) complex with zinc salt	Manzate DF	0,1	998	$1,76 \cdot 10^{-10}$
2-(4-mesyl-2-nitrobenzoyl)cyclohexane-1,3-dione	Callisto 480 SC	32	122	$4,99 \cdot 10^{-9}$
zinc ammoniate ethylenebis(dithiocarbamate) - poly(ethylenethiuram disulfide)	Polyram DF	1	500000	$1,00 \cdot 10^{-5 c}$
O,O-dimethyl S-phthalimidomethyl phosphorodithioate	Imidan 50 WP Instapak	3,1	716 ^d	$6,20 \cdot 10^{-4}$
4-hydroxy-1,3-dimethylpyrazol-4-yl)(a,a,a-trifluoro-2-mesyl-p-tolyl)methanone	Tundra (contient d'autres IA)	55,5	368	$3,92 \cdot 10^{-13}$
ethyl (R)-2-[4-(6-chloroquinoxalin-2-yloxy)phenoxy]propionate	Assure II	2	1816	$1,93 \cdot 10^{-5}$

suite page suivante

Tableau 14. (suite)

Ingrédient actif (IA)	Nom IUPAC	Nom commercial ^a	Demi-vie (j) ^b	K_{oc} (mL/g)	Constante d'Henry à 20°C (-)
S-métolachlore	mélange : (aRS,1S)-2-chloro-6'-ethyl-N-(2-methoxy-1-methylethyl)acet-o-toluidide et 20-0% (aRS,1R)-2-chloro-6'-ethyl-N-(2-methoxy-1-methylethyl)acet-o-toluidide	Dual Magnum	15	100 ^c	8,98 10 ⁻⁷
Spinétorame	Mélange de 50-90% (2R,3aR,5aR,5bS,9S,13S,14R,16aS,16bR)-2-(6-deoxy-3-O-ethyl-2,4-di-O-methyl- α -L-mannopyranosyloxy)-13-[(2R,5S,6R)-5-(diméthylamino) tétrahydro-6-méthylpyran-2-yloxy]-9-ethyl-2,3,3a,4,5,5a,5b,6,9,10,11,12,13,14,16a,16b-hexadécahydro-14-méthyl-1H-as-indaceno [3,2-d]oxacyclododécine-7,15-dione et de 50-10% (2S,3aR,5aS,5bS,9S,13S,14R,16aS,16bS)-2-(6-deoxy-3-O-ethyl-2,4-di-O-méthyl- α -L-mannopyranosyloxy)-13-[(2R,5S,6R)-5-(diméthylamino)tétrahydro-6-méthylpyran-2-yloxy]-9-ethyl-2,3,3a,5a,5b,6,9,10,11,12,13,14,16a,16b-tétradécahydro-4,14-diméthyl-1H-as-indaceno[3,2-d]oxacyclododécine-7,15-dione	Radiant SC	16,1	22836	6,04 10 ⁻⁷
Sulfate de streptomycine	5-(2,4-diguanidino-3,5,6-trihydroxy-cyclohexoxy)-4-[4,5-dihydroxy-6-(hydroxyméthyl)-3-méthylamino-tétrahydropyran-2-yl]oxy-3-hydroxy-2-méthyl-tétrahydrofuran-3-carbaldehyde	Streptomycin 17	18 ^d	10 ^c	1,00 10 ^{-20c}
Thiaclopride	(Z)-3-(6-chloro-3-pyridylméthyl)-1,3-thiazolidin-2-ylidencyanamide	Calypso 480 SC	15,5	359 ^d	1,68 10 ⁻¹³
Thifensulfuron-méthyle	méthyl 3-(4-méthoxy-6-méthyl-1,3,5-triazin-2-ylcarbamoylsulfamoyle) thiophène-2-carboxylate	Pinnacle SG	4	28,3	2,30 10 ⁻⁸

suite page suivante

Tableau 14. (suite)

Ingrédient actif (IA)	Nom IUPAC	Nom commercial ^a	Demi-vie (j) ^b	K_{oc} (mL/g)	Constante d'Henry à 20°C (-)
Tribenuron-méthyle	methyl 2-[4-methoxy-6-methyl-1,3,5-triazin-2-yl(methyl) carbamoylsulfamoyl]benzoate	MPower R (contient du thifensulfuron-methyl)	14	35	$4,21 \cdot 10^{-12}$

^aCette liste est non exhaustive et à titre indicatif seulement.

^bValeur donnée pour le sol en conditions aérobies (Université d'Hertfordshire, 2013). Utilisée pour les formes solide, liquide et gazeuse.

^cValeur exacte fixée à partir d'une description qualitative des propriétés dans SAgE pesticides (2014).

^dValeur exacte donnée dans SAgE pesticides (2014).

Annexe B. Risque d'infection par la tavelure du pommier

Tableau 15. Nombre de feuilles (somme des pousses de bouquets et des pousses végétatives) en fonction de la température (selon Carisse et Jobin, 2006).

Nombre de feuilles	Degrés-jours base 5 °C depuis le 1 ^{er} avril (méthode standard)	Nombre de feuilles	Degrés-jours base 5 °C depuis le 1 ^{er} avril (méthode standard)	Nombre de feuilles	Degrés-jours base 5 °C depuis le 1 ^{er} avril (méthode standard)
1	96	10	166	19	386
2	110	11	178	20	430
3	120	12	184	21	478
4	120	13	206	22	534
5	130	14	230	23	598
6	133	15	254	24	674
7	140	16	282	25	766
8	148	17	314	26	882
9	154	18	348	27	1033

Tableau 16. Nombre d'heures de mouillure requis pour qu'il y ait risque d'infection en fonction de la température moyenne durant les heures de mouillure (selon Stensvand *et al.*, 1997; et Carisse et Jobin, 2006). Il y aura risque d'infection si le nombre d'heures requis est inférieur ou égal au nombre d'heures de mouillure estimé.*

Température moyenne durant les heures de mouillure (°C)	Nombre d'heures de mouillure requis	Température moyenne durant les heures de mouillure (°C)	Nombre d'heures de mouillure requis	Température moyenne durant les heures de mouillure (°C)	Nombre d'heures de mouillure requis
4 et -	> 24	12	8	20	6
5	21	13	8	21	6
6	18	14	7	22	6
7	15	15	7	23	6
8	13	16	6	24	6
9	12	17	6	25	8
10	11	18	6	26 et +	11
11	9	19	6		

* Si la hauteur de pluie pour le jour donné est inférieure à 1 mm, le risque d'infection est supposé nul. Si la hauteur de pluie pour le jour donné est supérieure à 5 mm, il est supposé que les feuilles sont mouillées durant toute la journée. Si la hauteur de pluie pour le jour donné se situe entre 1 et 5 mm, le point de rosée T_r (en °C) est établi approximativement comme suit (Lawrence, 2005) :

$$T_r = \frac{100 - \rho_s}{b} + T_{\min} \quad (2)$$

où T_{\min} = température minimale (°C) pour le jour donné;

ρ_s = humidité relative à partir de laquelle la rosée se produit (fixée à 90 %, comme le que suggère le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Ontario; OMAFRA, 2011);

$$b = \frac{100L}{R(T_{\min} + 273,15)^2};$$

L = enthalpie de vaporisation de l'eau (approximativement égale à $2,5 \times 10^6$ J/kg);

R = constante spécifique de la vapeur d'eau = 461,5 J/(kg x K).

Si T_r est plus grand que la température maximale (°C) pour le jour donné (T_{\max}), les feuilles sont mouillées durant toute la journée. Sinon, le nombre d'heures de mouillure est déterminé en supposant que la température suit une fonction sinusoïdale :

$$24 \left\{ \frac{\arcsin\left(\frac{T_r - T_{moy}}{A}\right)}{\pi} + \frac{1}{2} \right\} \quad (3)$$

$$\text{où } T_{moy} = \frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} \text{ et } A = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}.$$

Annexe C. Risque d'infection par le feu bactérien

Tableau 17. Valeur de risque (*risk value*) d'infection par le feu bactérien pour une journée donnée en fonction de sa température maximale. Ces valeurs proviennent du modèle *CougarBlight 2010* (Smith, 2010). Pour le nord-est de l'Amérique du Nord, le risque d'infection est considéré élevé si la valeur cumulée des quatre derniers jours dépasse 100 (scénario 2; Smith, 2010).

Température maximale (°C)	Valeur de risque	Température maximale (°C)	Valeur de risque	Température maximale (°C)	Valeur de risque
9,5 et -	0	19,5	11,1	29,5	390
10,0	0,1	20,0	14	30,0	410
10,5	0,15	20,5	20	30,5	425
11,0	0,2	21,0	28	31,0	435
11,5	0,3	21,5	37	31,5	440
12,0	0,5	22,0	43	32,0	470
12,5	0,7	22,5	52	32,5	490
13,0	1,1	23,0	61	33,0	508
13,5	1,4	23,5	70	33,5	525
14,0	1,7	24,0	76	34,0	535
14,5	2,0	24,5	92	34,5	540
15,0	2,8	25,0	111	35,0	535
15,5	3,0	25,5	135	35,5	450
16,0	3,3	26,0	160	36,0	310
16,5	3,8	26,5	194	36,5	120
17,0	4,6	27,0	228	37,0	60
17,5	5,5	27,5	260	37,5	30
18,0	6,5	28,0	295	38,0	15
18,5	7,3	28,5	330	38,5	5
19,0	8,2	29,0	360	39,0 et +	0

Annexe D. Caractéristiques des sites

Tableau 18. Caractéristiques des sites étudiés.

no	Culture(s)	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Superficie (ha)	Pente moyenne (%)	Curve number moyen ^a	Carbone organique (%) ^b	Capacité au champ (%) ^b	Densité apparente (g/cm ³) ^b
1	maïs/soya	46,00	-73,50	50	26,01	1,5	62	2,6	41	1,20
2	blé	45,80	-73,75	50	9,4	1,5	62	2,6	41	1,20
3	blé	46,87	-72,40	150	12,57	1,5	81	45,4	50	0,20
4	maïs/soya	46,40	-72,85	50	21,17	14,0	81	3,8	33	1,30
5	maïs/soya	45,15	-74,00	50	5,78	1,5	81	2,2	34	1,35
6	blé	45,225	-73,505	50	6,13	1,3	81	2,6	30	1,40
7	maïs/soya	45,80	-73,00	25	8,55	1,5	62	1,8	26	1,35
8	blé	45,60	-72,95	25	5,71	1,4	62	4,9	39	1,15
9	maïs/soya	46,20	-72,50	50	39,04	1,5	81	4,1	31	1,50
10	blé	46,15	-72,355	75	12,41	2,0	62	1,8	26	1,35
11	maïs/soya	45,225	-71,85	250	24,21	6,9	81	8,2	26	1,30
12	blé	45,14	-71,75	450	3,18	8,0	81	8,2	26	1,30
13	maïs/soya	46,52	-71,62	120	9,8	1,5	73	6,8	36	1,35
14	blé	46,00	-70,78	400	16,03	3,6	81	15,7	33	1,25
15	maïs/soya	46,93	-70,93	75	4,64	1,5	73	0,6	27	1,25
16	blé	46,96	-71,05	75	4,35	4,6	62	0,6	8	1,60
17	blé/maïs/soya	47,43	-70,50	5	16,03	1,5	73	2,0	36	1,25
18	maïs/soya	48,40	-71,88	150	8,66	1,5	73	11,8	37	1,30
19	blé	48,90	-72,54	150	18,6	1,5	81	2,8	33	1,25

suite page suivante

Tableau 18. (suite)

no	Culture(s)	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Superficie (ha)	Pente moyenne (%)	Curve number moyen ^a	Carbone organique (%) ^b	Capacité au champ (%) ^b	Densité apparente (g/cm ³) ^b
20	pomme	45,565	-73,99	75	4,71	3,1	73	2,6	38	1,15
21	pomme	45,02	-73,62	100	2,36	1,3	62	6,8	21	1,20
22	pomme	45,275	-74,11	50	13,96	1,4	62	2,6	41	1,20
23	pomme	45,445	-73,06	75	2,18	5,1	62	4,6	21	1,35
24	pomme	45,395	-72,835	100	2,47	1,4	81	9,8	21	1,30
25	pomme	45,166	-72,275	275	3,19	9,4	81	3,1	25	1,35
26	pomme	46,96	-70,96	100	7,49	4,1	73	0,6	27	1,25
27	pomme	45,503	-74,005	50	0,94	8,0	62	2,7	25	1,30
28	pomme	45,652	-74,03	75	1,39	1,5	62	3,9	29	1,30

^aEstimé à partir des valeurs suggérées dans Suarez (2005) pour chaque groupe hydrologique (A, B, C ou D). Les groupes hydrologiques ont été déterminés à partir de la conductivité hydraulique à saturation (Annexe E).

^bValeur pour la couche de sol supérieure.

Annexe E. Paramètres du modèle PRZM

Tableau 19. Définition des paramètres les plus importants du modèle PRZM avec leur distribution statistique sélectionnée. Le choix des dates d'émergence, de maturité, de récolte et d'applications de pesticides est expliqué à la Section 4.2 et n'est pas présenté dans ce tableau.

Paramètre (Processus associé)	Définition	Valeur / Distribution *	Description/Justification
AFIELD (érosion)	Aire du champ (ha)	Donné par la FADQ	AFIELD est mis en relation avec le paramètre HL pour le calcul de l'érosion. AFIELD est fixe, mais HL varie aléatoirement.
AMXDR (croissance de la culture)	Profondeur des racines à maturité (cm)	$N(x; \sigma)$	Les valeurs de x et σ sont choisies de sorte que l'ensemble des valeurs possibles d'AMXDR pour une culture donnée (Suarez, 2005; Tableau 5.9) soit couvert par l'intervalle $x \pm 3\sigma$.
APPEFF (application des pesticides)	Efficacité de l'application	1	Aucune perte lors de l'application n'est considérée.
BD (propriétés du sol)	Densité apparente de chaque couche de sol (g/cm^3)	$X_{BD} - (1/6) Z_{THEFC}$	X_{BD} = valeur de la densité apparente pour le type de sol correspondant au site donné (AAC, 2010); la valeur 1/6 est une approximation de la variabilité inter-couches de la densité apparente effectuée sur l'ensemble des types de sol de la base de données d'AAC (2010); et $Z_{THEFC} = (THEFC - X_{THEFC})/0,065$ (voir paramètre THEFC). Étant donné la forte corrélation négative entre BD et THEFC, la même valeur pseudo-aléatoire est utilisée pour la sélection des valeurs de ces deux paramètres pour chaque réalisation (Annexe F).
BIOFLG (chimie des pesticides)	Simulation de la biodégradation	0	La biodégradation est considérée implicitement dans les taux de dégradation, mais elle n'est pas simulée directement.
CAM (application des pesticides)	Méthode d'application des pesticides	CAM = 9, sauf pour incorporation (CAM = 5)	CAM = 9 : Application foliaire; l'interception augmente linéairement avec le couvert végétal. Ce qui atteint le sol s'infiltré jusqu'à la profondeur DEPI, entrée par l'utilisateur. CAM = 5 : Incorporation dans le sol; le taux augmente linéairement de la surface jusqu'à une profondeur DEPI, entrée par l'utilisateur.

suite page suivante

Tableau 19. (suite)

Paramètre (Processus associé)	Définition	Valeur / Distribution *	Description/Justification
CINTCP (croissance de la culture)	Interception de la pluie par la culture à maturité (cm)	$N(x; \sigma)$	Les valeurs de x et σ sont choisies de sorte que l'ensemble des valeurs possibles de CINTCP pour une culture donnée (Suarez, 2005; Tableau 5.4) soit couvert par l'intervalle $x \pm 3\sigma$.
CN (hydrologie)	<i>Runoff curve number</i> (conditions normales d'humidité du sol)	$N(x; \sigma)$ max = 99	Pour le groupe hydrologique A : $x = 62$ et $\sigma = 5$; pour le groupe hydrologique B : $x = 73$ et $\sigma = 5$; pour le groupe hydrologique C : $x = 81$ et $\sigma = 3,5$; et pour le groupe hydrologique D : $x = 85$ et $\sigma = 3$. Les groupes hydrologiques ont été définis en fonction de la plus petite valeur de conductivité hydraulique à saturation dans les premiers 100 cm de sol (USDA, 2004). Les valeurs de x et σ sont choisies de sorte que l'ensemble des valeurs de CN pour un groupe hydrologique donné (Suarez, 2005; Tableau 5.10) soit couvert par l'intervalle $x \pm 3\sigma$. La valeur de CN est diminuée de 2 et 4 % pour le travail réduit et le semis direct respectivement.
CORED (propriétés du sol)	Profondeur du sol (cm)	X	X = valeur pour le type de sol correspondant au site donné (AAC, 2010).
COVMAX (croissance de la culture)	Couverture végétale à maturité (%)	$N(90,3)$ max = 99	Le manuel (Suarez, 2005) suggère des valeurs entre 80 et 100 %.
DAIR (chimie des pesticides)	Coefficient de diffusion du pesticide dans l'air (cm ² /jour)	4300	Valeur suggérée dans le manuel (Suarez, 2005). Considérée identique pour tous les ingrédients actifs.
DEPI (application des pesticides)	Profondeur d'application des pesticides (cm)	$N(4,1)$ min = 1	Le modèle donne une valeur par défaut de 4 cm. L'intervalle est spécifié de sorte que $\mu - 3\sigma$ atteigne 1 cm.

suite page suivante

Tableau 19. (suite)

Paramètre (Processus associé)	Définition	Valeur / Distribution *	Description/Justification
DGRATE (chimie des pesticides)	Taux de dégradation du pesticide en phase gazeuse (jour ⁻¹)	$\ln(2)/X$	X = Demi-vie de l'ingrédient actif (Annexe A).
DISP (chimie des pesticides/ propriétés du sol)	Coefficient de dispersion hydrodynamique de chaque pesticide pour chaque couche de sol	0	La diffusion des pesticides est considérée, mais la dispersion hydrodynamique des pesticides n'est pas simulée explicitement.
DKFLG2 (chimie des pesticides)	Modèle de dégradation biphasique	0	Dégradation biphasique non considérée.
DPN (paramètre de programmation)	Épaisseurs des unités de simulation pour chaque couche de sol (cm)	première couche : entre 0,1 et 0,5 ; autres couches : entre 1 et 5 ; selon l'épaisseur	Ordres de grandeur suggérés dans le manuel (Suarez, 2005).
DRFT (application des pesticides)	Dérive des pesticides	0	La dérive des pesticides causée par le vent n'est pas considérée.
DSRATE (chimie des pesticides)	Taux de dégradation du pesticide en phase solide (jour ⁻¹)	$\ln(2)/X$	X = Demi-vie de l'ingrédient actif (Annexe A).
DWRATE (chimie des pesticides)	Taux de dégradation du pesticide en phase liquide (jour ⁻¹)	$\ln(2)/X$	X = Demi-vie de l'ingrédient actif (Annexe A).

suite page suivante

Tableau 19. (suite)

Paramètre (Processus associé)	Définition	Valeur / Distribution *	Description/Justification
ENPY (chimie des pesticides)	Enthalpie de vaporisation du pesticide (kcal/mole)	20	Valeur suggérée dans le manuel (Suarez, 2005). Considérée identique pour tous les ingrédients actifs.
ERFLAG (érosion)	Modèle pour le calcul de l'érosion	UD(2, 3, 4)	Ce sont les trois modèles disponibles dans PRZM (2 = MUSLE, 3 = MUST, 4 = MUSS).
FEXTRC (chimie des pesticides)	Coefficient d'extraction foliaire des pesticides (par cm de pluie)	N(0,3; 0,07) min = 0,01	Les valeurs de x (0,3) et σ (0,07) sont choisies de sorte que l'intervalle (0,1; 0,5) soit couvert par l'intervalle $x \pm 3\sigma$. Les valeurs 0,1 et 0,5 sont suggérées par le manuel de PRZM (Suarez, 2005) et pour le projet européen FOOTPRINT (2008) respectivement.
HENRYK (chimie des pesticides)	Constante d'Henry du pesticide (-)	X	X = valeur de la constante d'Henry à 20°C, unique pour chaque ingrédient actif (Annexe A). À noter que la volatilisation simulée par PRZM est négligeable lorsque $X < 10^{-4}$ (Farenhorst <i>et al.</i> , 2009). C'est le cas pour tous les ingrédients actifs considérés, sauf le phosmet (Annexe A).
HL (érosion)	<i>Hydraulic length</i> (m)	U(a,b)	Les valeurs a et b sont respectivement les plus petite et plus grande distances estimées à l'aide d'ArcGIS permettant de traverser un site donné. Par exemple, si le site était rectangulaire, a et b seraient les longueurs de côtés.
HTMAX (croissance de la culture)	Hauteur de la culture à maturité (cm)	N($x; \sigma$)	Les valeurs de x et σ sont choisies de sorte que l'ensemble des valeurs possibles de HTMAX pour une culture donnée (Suarez, 2005; Tableau 5.16) soit couvert par l'intervalle $x \pm 3\sigma$. Pour la pomme $x = 400$ et $\sigma = 30$.
IPSCND (application des pesticides)	Déposition des pesticides après la récolte	= 2 en travail conventionnel, = 3 autrement	En travail conventionnel, il est supposé qu'il ne reste plus rien après la récolte (IPSCND = 2). En travail réduit ou en semis direct, il est supposé que les pesticides sur les feuilles sont toujours présents au champ (IPSCND = 3).

suite page suivante

Tableau 19. (suite)

Paramètre (Processus associé)	Définition	Valeur / Distribution *	Description/Justification
IREG (érosion)	Région définissant la forme du hyétogramme pour les pluies du 1 ^{er} mai au 15 septembre.	= 2, 3 ou 4 avec probabilité 1/4, 1/2 et 1/4 respectivement	Les régions sont présentées à la Figure 5.8 (Suarez, 2005) pour les États-Unis. Pour l'ensemble des États-Unis, à l'exception des zones côtières, des pluies de type II (IREG = 3) sont suggérées, d'où la raison de choisir plus souvent IREG = 3, que IREG = 2 ou 4. Cependant, étant donné la variabilité temporelle des précipitations estivales, les pluies de types IA (IREG = 2; utilisé pour la côte ouest américaine) et III (IREG = 4; utilisé pour la côte est américaine) sont aussi considérées.
IRFLAG (hydrologie)	Simulation de l'irrigation	0	Irrigation pas considérée.
ITFLAG (propriétés du sol)	Simulation de la température du sol	0	Température du sol pas simulée.
KD (chimie des pesticides/ propriétés du sol)	Coefficient de distribution sol/eau du pesticide pour chaque couche de sol (cm ³ /g)	$K_{oc} \cdot OC$	La variable K_{oc} est le coefficient de partage carbone organique/eau du pesticide (Annexe A) et OC est la fraction de carbone organique dans le sol.
MNGN (érosion)	Coefficient de rugosité de Manning	$N(x; \sigma)$	Pour la pomme, $x = 0,24$ et $\sigma = 0,02$, afin que l'intervalle couvre l'ensemble des valeurs suggérées pour le gazon dense (Suarez, 2005; Tableau 5.46). Pour les autres cultures, du milieu de la saison jusqu'à la récolte, $x = 0,17$ et $\sigma = 0,02$ alors que pour le restant de l'année, x et σ sont choisis de sorte que l'ensemble des valeurs possibles de MNGN pour un travail du sol et une quantité de résidus (dépendant de la culture) donnés (Suarez, 2005; Tableau 5.46) soit couvert par l'intervalle $x \pm 3\sigma$.

suite page suivante

Tableau 19. (suite)

Paramètre (Processus associé)	Définition	Valeur / Distribution *	Description/Justification
NHORIZ (propriétés du sol)	Nombre total de couches de sol	X	X = valeur pour le type de sol correspondant au site donné (AAC, 2010).
OC (propriétés du sol)	Pourcentage de carbone organique de chaque couche de sol (%)	$N(X_{OC} + 3 \cdot 0,3 \cdot Z_{THEFC}; 3 \cdot (1 - 0,3^2)^{1/2})$ min = 0,1 max = 99	X_{OC} = pourcentage de carbone organique pour le type de sol correspondant au site donné (AAC, 2010). Les valeurs 3 et 0,3 sont respectivement des approximations de la variabilité inter-couches pour OC et du coefficient de corrélation entre OC et THEFC effectuée sur l'ensemble des types de sol de la base de données d'AAC (2010). $Z_{THEFC} = (THEFC - X_{THEFC})/0,065$ (voir paramètre THEFC).
PLDKRT (chimie des pesticides)	Taux de dégradation des pesticides sur les feuilles (jour^{-1})	$\ln(2)/X$	X = Demi-vie de l'ingrédient actif (Annexe A).
PLVKRT (chimie des pesticides)	Taux de dégradation des pesticides sur les feuilles causée par la volatilisation (jour^{-1})	0	La volatilisation est implicitement considérée dans PLDKRT.
SFAC (hydrologie)	Facteur de fonte journalier ($\text{cm}/^\circ\text{C}$)	$N(0,5; 0,1)$ min = 0,1	Couvre l'intervalle suggéré pour les <i>open areas</i> (Suarez, 2005; Tableau 5.1)
SLP (érosion)	Pente (%)	$U(a,b)$	Les valeurs <i>a</i> et <i>b</i> sont respectivement les plus petite et plus grande valeurs de pente calculées à l'échelle du pixel par ArcGIS sur un site donné.
TAPP (application des pesticides)	Taux d'application de l'ingrédient actif (kg/ha)	$U(a,b)$	Les valeurs <i>a</i> et <i>b</i> sont respectivement les plus petite et plus grande valeurs obtenues de SAgE pesticides (2014). Présentées à la Section 4.2.2.

suite page suivante

Tableau 19. (suite)

Paramètre (Processus associé)	Définition	Valeur / Distribution *	Description/Justification
THEFC (propriétés du sol)	Capacité au champ pour chaque couche de sol (cm ³ d'eau / cm ³ de sol)	$N(X_{THEFC}; 0,065)$ min = 0,01 max = 0,99	X_{THEFC} = valeur de capacité au champ pour le type de sol correspondant au site donné (AAC, 2010). La valeur 0,065 est une approximation de la variabilité inter-couches effectuée sur l'ensemble des types de sol de la base de données d'AAC (2010).
THETO (propriétés du sol)	Teneur en eau initial pour chaque couche de sol (cm ³ d'eau / cm ³ de sol)	THEFC	Les simulations démarrent en janvier; il est supposé que la capacité au champ est alors atteinte. Ce paramètre a relativement peu d'impact.
THEWP (propriétés du sol)	Point de flétrissement pour chaque couche de sol (cm ³ d'eau / cm ³ de sol)	$X_{THEWP} + 0,045 Z_{THEFC}$ min = 0,01 max = 0,99	X_{THEWP} = valeur du point de flétrissement pour le type de sol correspondant au site donné (AAC, 2010); la valeur 0,045 est une approximation de la variabilité inter-couches effectuée sur l'ensemble des types de sol de la base de données d'AAC (2010); et $Z_{THEFC} = (THEFC - X_{THEFC})/0,065$ (voir paramètre THEFC). Étant donné la forte corrélation positive entre THEWP et THEFC, la même valeur pseudo-aléatoire est utilisée pour la sélection des valeurs de ces deux paramètres pour chaque réalisation (Annexe F).
THKNS (propriétés du sol)	Épaisseur de chaque couche de sol (cm)	X	X = valeur pour le type de sol correspondant au site donné (AAC, 2010).
UPTKF (croissance de la culture)	Assimilation des pesticides par la culture (fraction de la transpiration x concentration en phase liquide)	U(0,1)	Il y a beaucoup d'incertitude pour ce paramètre. Les valeurs suggérées dans le manuel (Suarez, 2005) couvrent presque l'intervalle (0,1).

suite page suivante

Tableau 19. (suite)

Paramètre (Processus associé)	Définition	Valeur / Distribution *	Description/Justification
USLEC (érosion)	Facteur <i>C</i> de l'équation d'érosion	$N(x; \sigma)$	x = valeur donnée au Tableau C-3b de Wall <i>et al.</i> (2002) dépendant de la culture et du travail du sol (conventionnel, travail réduit et semis direct); σ = écart moyen des valeurs suggérées entre les différents types de travail du sol pour une culture donnée.
USLEK (érosion)	Facteur <i>K</i> de l'équation d'érosion	$N(x; 0,04)$ min = 0,02	x = valeur donnée au Tableau 5.3 (Suarez, 2005) dépendant de la texture et du contenu en matière organique de la première couche de sol; σ = écart moyen des valeurs suggérées entre les différents seuils de matière organique pour une texture de sol donnée.
USLELS (érosion)	Facteur <i>LS</i> de l'équation d'érosion	$\left(\begin{array}{l} 65,41 \sin(p)^2 \\ + 4,56 \sin(p) \\ + 0,065 \end{array} \right)$ $\times \left(\frac{H}{22,13} \right)^m$	Équation donnée dans Wall <i>et al.</i> (2002) avec H = <i>hydraulic length</i> (HL, en m), p = pente (en radian) et $m = 0,2$ si la pente est < 1 %, $m = 0,3$ si la pente est entre 1 et 3 %, $m = 0,4$ si la pente est entre 3 et 5 % et $m = 0,5$ si la pente est > 5 %. USLELS est fixe, mais ses paramètres (pente, <i>hydraulic length</i>) varient aléatoirement.
USLEP (érosion)	Facteur <i>P</i> de l'équation d'érosion	Fixé à 1	Les pratiques de conservation considérées par USLEP n'ont pas été simulées.

*Distributions : $N(\mu; \sigma)$: Normale avec espérance μ et écart-type σ ; $U(a,b)$: Uniforme entre a et b ; $UD(\Omega)$: Uniforme discrète sur les valeurs de l'ensemble Ω .

Annexe F. Valeurs pseudo-aléatoires utilisées par le modèle stochastique

Tableau 20. Valeurs pseudo-aléatoires u suivant la distribution uniforme (0,1) utilisées pour la sélection des valeurs de paramètres pour chaque réalisation. Les paramètres « crop_days » et « appl_days » définissent les dates liées à la croissance (semis et récolte; Section 4.2.1) et les dates d'applications (Section 4.2.2) respectivement. Les autres paramètres et leurs distributions sont présentés à l'Annexe E.

Réalisation	SFAC	ERFLAG ^a	USLEK	USLEP	IREG ^b	SLP	HL	CINTCP	AMXDR	COVMAX	HTMAX	crop_days	USLEC	MNGN	CN	DEPI	TAPP	UPTKF	FEXTRC	THEFC, THEWP, -BD	OC	appl_days
1	1,00	0,61	1,00	0,49	0,03	0,27	0,63	0,56	0,69	0,84	0,33	0,09	0,33	0,23	0,22	0,94	0,05	0,02	1,00	0,61	1,00	0,49
2	0,22	0,04	0,27	0,11	0,07	0,49	0,40	0,81	0,91	0,32	0,96	0,57	0,11	0,39	0,03	0,79	0,48	0,42	0,22	0,04	0,27	0,11
3	0,98	0,56	0,50	0,54	0,95	0,61	0,01	0,95	0,59	0,29	0,56	0,19	0,69	0,12	0,39	0,91	0,21	0,10	0,98	0,56	0,50	0,54
4	0,08	0,06	0,48	0,13	0,51	0,55	0,97	0,94	0,08	0,13	0,88	0,82	0,99	0,69	1,00	0,60	0,34	0,19	0,08	0,06	0,48	0,13
5	0,78	0,55	0,79	0,51	0,40	0,25	0,74	0,79	0,71	0,89	0,44	0,46	0,26	0,61	0,87	0,15	0,61	0,66	0,78	0,55	0,79	0,51
6	0,19	0,15	0,39	0,31	0,87	0,45	0,16	0,58	0,53	0,01	0,91	0,39	0,56	0,73	0,14	0,95	0,83	0,11	0,19	0,15	0,39	0,31
7	0,87	0,28	0,68	0,39	0,59	0,34	0,66	0,68	0,13	0,19	0,51	0,98	0,32	0,30	0,71	0,33	0,32	0,28	0,87	0,28	0,68	0,39
8	0,91	0,73	0,11	0,27	0,37	0,09	0,20	0,08	0,04	0,94	0,39	0,29	0,16	0,20	0,02	0,68	0,04	0,81	0,91	0,73	0,11	0,27
9	0,88	0,91	0,95	0,37	0,68	0,19	0,90	0,79	0,75	0,37	0,48	0,35	0,71	0,86	0,40	0,31	0,22	0,90	0,88	0,91	0,95	0,37
10	0,22	0,71	0,06	0,74	0,71	0,87	0,63	0,04	0,94	0,33	0,75	0,16	0,84	0,35	0,61	0,13	0,84	0,75	0,22	0,71	0,06	0,74
11	0,79	0,91	0,93	0,02	0,98	0,04	0,16	0,22	0,34	0,92	0,41	0,32	0,26	0,20	0,73	0,85	0,71	0,91	0,79	0,91	0,93	0,02
12	0,12	0,01	0,58	0,68	0,30	0,15	0,54	0,73	0,25	0,97	0,45	0,86	0,07	0,06	0,62	0,18	0,40	0,56	0,12	0,01	0,58	0,68
13	0,90	0,92	0,88	0,58	0,99	0,52	0,52	0,64	0,60	0,95	0,51	0,74	0,37	0,71	0,19	0,60	0,77	0,04	0,90	0,92	0,88	0,58
14	0,52	0,44	0,27	0,00	0,58	0,12	0,89	0,29	0,13	0,39	0,91	0,54	0,83	0,47	0,80	0,93	0,69	0,74	0,52	0,44	0,27	0,00
15	0,21	0,52	0,02	0,30	0,74	0,17	0,04	0,63	0,53	0,55	0,64	0,99	0,32	0,82	0,38	0,50	0,56	0,17	0,21	0,52	0,02	0,30
16	0,18	0,42	0,85	0,01	0,67	0,59	0,85	0,99	0,85	0,19	0,47	0,89	0,98	0,70	0,49	0,53	0,90	0,60	0,18	0,42	0,85	0,01
17	0,07	0,84	0,02	0,62	0,37	0,24	0,06	0,17	0,96	0,38	0,84	0,13	0,10	0,49	0,10	0,29	0,84	0,14	0,07	0,84	0,02	0,62
18	0,67	0,26	0,87	0,17	0,60	0,05	0,15	0,24	0,74	0,19	0,98	0,18	0,33	0,52	0,60	0,36	0,21	0,05	0,67	0,26	0,87	0,17
19	0,91	0,05	0,37	0,31	0,83	0,09	0,58	0,58	0,38	0,99	0,44	0,37	0,00	0,65	0,27	0,12	0,74	0,09	0,91	0,05	0,37	0,31
20	0,10	0,40	0,23	0,58	0,73	0,28	0,82	0,69	0,49	0,92	0,43	0,71	0,08	0,27	0,90	0,85	0,41	0,83	0,10	0,40	0,23	0,58

suite page suivante

Tableau 20. (suite)

Réalisation	SFAC	ERFLAG ^a	USLEK	USLEP	IREG ^b	SLP	HL	CINTCP	AMXDR	COVMAX	HTMAX	crop_days	USLEC	MNGN	CN	DEPI	TAPP	UPTKF	FEXTRC	THEFC, THEWP, -BD	OC	appL_days
21	0,71	0,99	0,03	0,52	0,29	0,61	0,29	0,71	0,82	0,24	0,09	0,92	0,75	0,93	0,05	0,19	0,16	0,32	0,71	0,99	0,03	0,52
22	0,02	0,31	0,36	0,84	0,12	0,51	0,21	0,99	0,42	0,19	0,96	0,99	0,66	0,33	0,06	0,23	0,67	0,95	0,02	0,31	0,36	0,84
23	0,16	0,13	0,27	0,10	0,28	0,70	0,98	0,40	0,29	0,15	0,07	0,50	0,78	0,20	0,03	0,57	0,10	0,42	0,16	0,13	0,27	0,10
24	0,51	0,89	0,55	0,30	0,68	0,72	0,40	0,43	0,56	0,14	0,27	0,26	0,43	0,09	0,34	0,94	0,77	0,32	0,51	0,89	0,55	0,30
25	0,78	0,23	0,40	0,16	0,22	0,94	0,10	0,41	0,70	0,44	0,27	0,99	0,74	0,97	0,49	0,43	0,17	0,46	0,78	0,23	0,40	0,16
26	0,47	0,54	0,31	0,79	0,36	0,91	0,64	0,81	0,29	0,77	0,62	0,18	0,61	0,48	0,93	0,78	0,07	0,95	0,47	0,54	0,31	0,79
27	0,79	0,83	0,85	0,49	0,52	0,99	0,64	0,08	0,58	0,16	0,82	0,00	0,15	0,30	0,90	0,89	0,53	0,20	0,79	0,83	0,85	0,49
28	0,57	0,53	0,40	0,64	0,38	0,99	0,65	0,53	0,75	0,88	0,12	0,06	0,98	0,46	0,85	0,60	0,77	0,68	0,57	0,53	0,40	0,64
29	0,88	0,45	0,04	0,45	0,73	0,02	0,71	0,80	0,69	0,14	0,64	0,54	0,04	0,63	0,83	0,26	0,95	0,35	0,88	0,45	0,04	0,45
30	0,31	0,48	0,82	0,04	0,29	0,05	0,99	0,31	0,32	0,18	0,99	0,56	0,72	0,19	0,90	0,87	1,00	0,67	0,31	0,48	0,82	0,04
31	0,28	0,66	0,96	0,06	0,31	0,20	0,37	0,62	0,42	0,72	0,13	0,64	0,46	0,60	0,70	0,60	0,63	0,18	0,28	0,66	0,96	0,06
32	0,62	0,94	0,67	0,63	0,13	0,95	0,12	0,97	0,39	0,98	0,85	0,13	0,50	0,36	0,66	0,96	0,99	0,42	0,62	0,94	0,67	0,63
33	0,32	0,85	0,52	0,17	0,25	0,10	0,55	0,46	0,67	0,65	0,44	0,77	0,00	0,22	0,97	0,04	0,39	0,39	0,32	0,85	0,52	0,17
34	0,06	0,86	0,10	0,80	0,71	0,36	0,71	0,48	0,37	0,46	0,24	0,60	0,76	0,98	0,39	0,10	0,90	0,57	0,06	0,86	0,10	0,80
35	0,73	0,58	0,47	0,26	0,02	0,00	0,15	0,39	0,76	0,27	0,49	0,69	0,11	0,69	0,88	0,70	0,15	0,08	0,73	0,58	0,47	0,26
36	0,29	0,62	0,65	0,63	0,42	0,51	0,70	0,89	0,17	0,05	0,07	0,69	0,53	0,99	0,10	0,70	0,85	0,32	0,29	0,62	0,65	0,63
37	0,43	0,10	0,05	0,25	0,71	0,15	0,64	0,36	0,31	0,48	0,73	0,61	0,34	0,12	0,67	0,27	0,93	0,37	0,43	0,10	0,05	0,25
38	0,29	0,64	0,90	0,80	0,30	0,76	0,82	0,97	0,66	0,25	0,58	0,67	0,64	0,18	0,66	0,46	0,05	0,04	0,29	0,64	0,90	0,80
39	0,54	0,44	0,13	0,72	0,13	0,71	0,52	0,31	0,95	0,18	0,94	0,93	0,09	0,67	0,67	0,35	0,35	0,74	0,54	0,44	0,13	0,72
40	0,91	0,30	0,12	0,64	0,13	0,19	0,46	0,39	0,34	0,91	0,46	0,93	0,49	0,97	0,64	0,04	0,06	0,03	0,91	0,30	0,12	0,64

suite page suivante

Tableau 20. (suite)

Réalisation	SFAC	ERFLAG ^a	USLEK	USLEP	IREG ^b	SLP	HL	CINTCP	AMXDR	COVMAX	HTMAX	crop_days	USLEC	MNGN	CN	DEPI	TAPP	UPTKF	FEXTRC	THEFC, THEWP, -BD	OC	appL_days
41	0,83	0,69	0,38	0,60	0,32	0,02	0,65	0,46	0,66	0,67	0,56	0,14	0,25	0,29	0,08	0,00	0,75	0,18	0,83	0,69	0,38	0,60
42	0,70	0,48	0,06	0,59	0,27	0,92	0,24	0,57	0,38	0,12	0,89	0,07	0,07	0,54	0,87	0,23	0,67	0,17	0,70	0,48	0,06	0,59
43	0,15	0,44	0,51	0,33	0,17	0,99	0,86	0,58	0,82	0,78	0,45	0,70	0,07	0,97	0,46	0,70	0,90	0,42	0,15	0,44	0,51	0,33
44	0,58	0,20	0,37	0,76	0,34	0,29	0,59	0,04	0,66	0,65	0,46	0,66	0,96	0,94	0,51	0,77	0,21	0,16	0,58	0,20	0,37	0,76
45	0,11	0,84	0,67	0,16	0,46	0,80	0,74	0,41	0,59	0,06	0,57	0,07	0,61	0,40	0,82	0,63	0,43	0,07	0,11	0,84	0,67	0,16
46	0,21	0,36	0,10	0,37	0,61	0,40	0,40	0,91	0,80	0,76	0,27	0,17	0,35	0,51	0,34	0,88	0,29	0,33	0,21	0,36	0,10	0,37
47	1,00	0,99	0,18	0,77	0,49	0,67	0,07	0,16	0,37	0,48	0,08	0,20	0,30	0,79	0,28	0,17	0,88	0,84	1,00	0,99	0,18	0,77
48	0,33	0,57	0,20	0,78	0,47	0,78	0,99	0,50	0,18	0,86	0,29	0,28	0,77	0,65	0,21	0,51	0,99	0,52	0,33	0,57	0,20	0,78
49	0,40	0,89	0,12	0,93	0,11	0,38	0,57	0,21	0,02	0,35	0,90	0,03	0,02	0,74	0,52	0,25	0,81	0,45	0,40	0,89	0,12	0,93
50	0,31	0,95	0,30	0,62	0,89	0,19	0,20	0,65	0,18	0,36	0,08	0,12	0,07	0,31	0,87	0,78	0,08	0,87	0,31	0,95	0,30	0,62
51	0,03	0,25	0,23	0,45	0,00	0,94	0,55	0,04	0,89	0,70	0,24	0,23	0,09	0,80	0,20	0,82	0,62	0,67	0,03	0,25	0,23	0,45
52	1,00	0,39	0,09	0,56	0,86	0,08	0,42	0,87	0,40	0,33	0,01	0,34	0,69	0,51	0,56	0,11	0,65	0,92	1,00	0,39	0,09	0,56
53	0,19	0,01	0,15	0,89	0,67	0,72	0,50	0,85	0,62	0,19	0,48	0,16	0,33	0,56	0,42	0,43	0,56	0,93	0,19	0,01	0,15	0,89
54	0,71	0,03	0,30	0,04	0,05	0,21	0,88	0,56	0,81	0,27	0,86	0,70	0,19	0,78	0,14	0,58	0,06	0,87	0,71	0,03	0,30	0,04
55	0,72	0,92	0,51	0,81	0,61	0,89	0,12	0,10	0,79	0,71	0,20	0,44	0,81	0,58	0,36	0,03	0,96	0,97	0,72	0,92	0,51	0,81
56	0,77	0,11	0,73	0,22	0,57	0,81	0,95	0,23	0,09	0,21	0,25	0,05	0,20	0,44	0,30	0,43	0,68	0,04	0,77	0,11	0,73	0,22
57	0,67	0,82	0,23	0,25	0,68	0,34	0,52	0,75	0,16	0,45	0,05	0,87	0,19	0,57	0,02	0,98	0,63	0,13	0,67	0,82	0,23	0,25
58	0,62	0,18	0,93	0,92	0,78	0,33	0,20	0,05	0,32	0,59	0,12	0,61	0,69	0,69	0,30	0,98	0,38	0,38	0,62	0,18	0,93	0,92
59	0,97	0,72	0,60	0,09	0,19	0,35	0,28	0,06	0,05	0,24	0,82	0,03	0,76	0,24	0,30	0,83	0,47	0,39	0,97	0,72	0,60	0,09
60	0,97	0,06	0,36	0,16	0,13	0,16	0,92	0,65	0,91	0,34	0,51	0,67	0,24	0,49	0,75	0,18	0,80	0,75	0,97	0,06	0,36	0,16

suite page suivante

Tableau 20. (suite)

Réalisation	SFAC	ERFLAG ^a	USLEK	USLEP	IREG ^b	SLP	HL	CINTCP	AMXDR	COVMAX	HTMAX	crop_days	USLEC	MNGN	CN	DEPI	TAPP	UPTKF	FEXTRC	THEFC, THEWP, -BD	OC	appL_days
61	0,34	0,16	0,12	0,88	0,10	0,73	0,24	0,34	0,07	0,49	0,49	0,91	0,29	0,72	0,34	0,47	0,19	0,25	0,34	0,16	0,12	0,88
62	0,84	0,44	0,84	0,15	0,65	0,28	0,49	0,21	0,92	0,07	0,59	0,71	0,77	0,56	0,50	0,57	0,43	0,92	0,84	0,44	0,84	0,15
63	0,08	0,61	0,62	0,14	0,83	0,38	0,44	0,79	0,93	0,88	0,73	0,60	0,39	0,76	0,21	0,97	0,53	0,24	0,08	0,61	0,62	0,14
64	0,55	0,48	0,74	0,99	0,37	0,67	0,91	0,86	0,56	0,95	0,35	0,31	0,88	0,53	0,45	0,61	1,00	0,54	0,55	0,48	0,74	0,99
65	0,06	0,59	0,75	0,75	0,78	0,02	0,12	0,38	0,94	0,38	0,80	0,80	0,19	0,32	0,48	0,30	0,27	0,45	0,06	0,59	0,75	0,75
66	0,82	0,66	0,30	0,37	0,63	0,56	0,52	0,11	0,62	0,81	0,90	0,38	0,79	0,70	0,76	0,82	0,31	0,28	0,82	0,66	0,30	0,37
67	0,33	0,27	0,56	0,83	0,69	0,02	0,54	0,58	0,99	0,08	0,29	0,59	0,01	0,44	0,11	0,37	0,95	0,13	0,33	0,27	0,56	0,83
68	0,97	0,47	0,49	0,29	0,07	0,68	0,66	0,21	0,34	0,96	0,38	0,46	0,22	0,20	0,48	0,76	0,81	0,42	0,97	0,47	0,49	0,29
69	0,83	0,76	0,02	0,15	0,93	0,33	0,97	0,81	0,71	0,80	0,83	0,65	0,99	0,52	0,16	0,70	0,88	0,61	0,83	0,76	0,02	0,15
70	0,51	0,76	0,34	0,98	0,81	0,10	0,75	0,90	0,92	0,23	0,95	0,86	0,18	0,81	0,52	0,33	0,93	0,68	0,51	0,76	0,34	0,98
71	0,32	0,56	0,21	0,14	0,37	0,31	0,10	0,60	0,79	0,54	0,28	0,67	0,15	0,49	0,25	0,65	0,37	0,82	0,32	0,56	0,21	0,14
72	0,49	0,71	0,57	0,01	0,98	0,45	0,76	0,10	0,35	0,91	0,28	0,87	0,00	0,36	0,31	0,12	0,97	0,96	0,49	0,71	0,57	0,01
73	0,21	0,95	0,88	0,58	0,76	0,82	0,55	0,10	0,32	0,74	0,80	0,92	0,33	0,07	0,50	0,55	0,26	0,15	0,21	0,95	0,88	0,58
74	0,34	0,79	0,41	0,88	0,18	0,47	0,83	0,88	0,44	0,83	0,07	0,64	0,74	0,64	0,66	0,66	0,13	0,36	0,34	0,79	0,41	0,88
75	0,63	0,17	0,79	0,72	0,02	0,17	0,80	0,77	0,51	0,52	0,40	0,56	0,79	0,72	0,41	0,07	0,55	0,95	0,63	0,17	0,79	0,72
76	0,97	0,82	0,60	0,52	0,73	0,99	0,33	0,46	0,54	0,41	0,63	0,52	0,79	0,22	0,13	0,72	0,84	0,11	0,97	0,82	0,60	0,52
77	0,67	0,32	0,62	0,29	0,28	0,74	0,90	0,70	0,59	0,52	0,21	0,02	0,11	0,39	0,14	0,02	0,42	1,00	0,67	0,32	0,62	0,29
78	0,37	0,88	0,29	0,45	0,89	0,12	0,96	0,86	0,86	0,18	0,31	0,31	0,96	0,19	0,02	0,22	0,98	0,44	0,37	0,88	0,29	0,45
79	0,33	0,17	0,74	0,79	0,55	0,95	0,48	0,75	0,38	0,77	0,76	0,08	0,69	0,47	0,84	0,41	0,93	0,84	0,33	0,17	0,74	0,79
80	0,14	0,69	0,54	0,06	0,43	0,22	0,34	0,50	0,84	0,96	0,51	0,31	0,35	0,37	0,18	0,98	0,76	0,04	0,14	0,69	0,54	0,06

suite page suivante

Tableau 20. (suite)

Réalisation	SFAC	ERFLAG ^a	USLEK	USLEP	IREG ^b	SLP	HL	CINTCP	AMXDR	COVMAX	HTMAX	crop_days	USLEC	MNGN	CN	DEPI	TAPP	UPTKF	FEXTRC	THEFC, THEWP, -BD	OC	appL_days
81	0,95	0,56	0,65	0,37	0,66	0,29	0,20	0,61	0,95	0,27	0,40	0,88	0,88	0,15	0,15	0,46	0,40	0,54	0,95	0,56	0,65	0,37
82	0,52	0,54	0,19	0,98	0,89	0,90	0,87	0,97	0,15	0,01	0,88	0,39	0,19	0,86	0,54	0,17	0,20	0,10	0,52	0,54	0,19	0,98
83	0,16	0,75	0,89	0,85	0,58	0,12	0,85	0,73	0,29	0,63	0,29	0,23	0,90	0,83	0,60	0,63	0,91	0,96	0,16	0,75	0,89	0,85
84	0,86	0,11	0,40	0,39	0,65	0,78	0,01	0,90	0,82	0,88	0,52	0,83	0,34	0,47	0,33	0,11	0,15	0,55	0,86	0,11	0,40	0,39
85	0,90	0,94	0,91	0,38	0,21	0,48	0,33	0,10	0,77	0,05	0,76	0,20	0,46	0,43	0,34	0,15	0,17	0,18	0,90	0,94	0,91	0,38
86	0,14	0,33	0,34	0,31	0,42	0,39	0,25	0,95	0,41	0,54	0,59	0,58	0,05	0,01	0,92	0,78	0,14	0,11	0,14	0,33	0,34	0,31
87	0,94	0,46	0,33	0,13	0,43	0,21	0,72	0,10	0,04	0,29	0,76	0,78	0,10	0,40	0,66	0,29	0,55	0,14	0,94	0,46	0,33	0,13
88	0,59	0,08	0,07	0,41	0,60	0,98	0,48	0,64	0,03	0,96	0,81	0,51	0,03	0,95	0,52	0,62	0,33	0,54	0,59	0,08	0,07	0,41
89	0,82	0,46	0,28	0,47	0,01	0,96	0,82	0,95	0,59	0,23	0,13	0,68	0,83	0,90	0,63	0,27	0,36	0,78	0,82	0,46	0,28	0,47
90	0,07	0,07	0,67	0,48	0,59	0,59	0,47	0,22	0,15	0,94	0,61	0,93	0,66	0,24	0,24	0,99	0,35	0,72	0,07	0,07	0,67	0,48
91	0,94	0,52	0,41	0,77	0,57	0,01	0,59	0,36	0,95	0,39	0,90	0,64	0,75	0,50	0,28	0,54	0,39	0,11	0,94	0,52	0,41	0,77
92	0,47	0,03	0,43	0,15	0,69	0,18	0,71	0,21	0,11	0,26	0,24	0,12	0,26	0,73	0,55	0,05	0,31	0,61	0,47	0,03	0,43	0,15
93	0,57	0,85	0,01	0,22	0,02	0,39	0,33	0,53	0,69	0,48	0,14	0,84	0,45	0,66	0,20	0,36	0,73	0,26	0,57	0,85	0,01	0,22
94	0,13	0,72	0,64	0,21	0,31	0,01	0,86	0,00	0,27	0,22	0,98	0,87	0,69	0,77	0,11	0,98	0,27	0,47	0,13	0,72	0,64	0,21
95	0,49	0,69	0,87	0,02	0,69	0,04	0,28	0,82	0,42	0,92	0,08	0,65	0,98	0,32	0,68	0,99	0,27	0,78	0,49	0,69	0,87	0,02
96	0,16	0,62	0,37	0,60	0,84	0,32	0,20	0,67	0,86	0,09	0,97	0,46	0,22	0,65	0,65	0,02	0,33	0,54	0,16	0,62	0,37	0,60
97	0,94	0,98	0,62	0,48	0,44	0,93	0,56	0,86	0,35	0,47	0,19	0,47	0,81	0,43	0,98	0,73	0,41	0,94	0,94	0,98	0,62	0,48
98	0,91	0,37	0,09	0,06	0,99	0,10	0,05	0,21	0,57	0,28	0,77	0,26	0,23	0,58	0,06	0,76	0,44	0,49	0,91	0,37	0,09	0,06
99	0,14	0,93	0,07	0,70	0,51	0,13	0,13	0,02	0,68	0,13	0,47	0,07	0,33	0,36	0,72	0,82	0,82	0,64	0,14	0,93	0,07	0,70
100	0,27	0,20	0,52	0,15	0,03	0,92	0,78	0,53	0,74	0,58	0,55	0,83	0,47	0,60	0,38	0,72	0,41	0,14	0,27	0,20	0,52	0,15

^aERFLAG = 2 si $u < 1/3$, ERFLAG = 3 si $u > 1/3$ et $u < 2/3$, et ERFLAG = 4 si $u > 2/3$.

^bIREG = 3 si $u < 1/2$, IREG = 2 si $u > 1/2$ et $u < 3/4$, et IREG = 4 si $u > 3/4$.

Remerciements

Ce projet a été financé par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). Les données de modèles climatiques ont été mises à l'échelle et fournies par le Consortium Ouranos. Nous remercions Jean-François Martineau (Financière agricole du Québec, FADQ) pour avoir transmis les données agricoles ayant permis la sélection des sites, Isabelle Beaudin (IRDA) pour avoir transmis l'information pédologique sur les sites retenus ainsi que Roland Joannin (Agropomme) et Vincent Phillion (IRDA) pour leurs commentaires constructifs.