

RAPPORT

Mise l'essai d'une machine à vent comme méthode de protection contre le gel des fleurs dans le bleuets sauvage cultivé pour le marché de la transformation



Lélia Anderson, Carl Boivin et Jérémie Vallée

Mars 2022

Ce projet a été financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation dans le cadre du Programme d'appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région.

Québec 

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) a été constitué en mars 1998 par quatre fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation (MEI).

L'Institut est une corporation de recherche à but non lucratif, qui travaille chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

Notre mission

L'IRDA a pour mission de soutenir le développement d'une agriculture durable au Québec en favorisant le recours à l'innovation et aux partenariats.

Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable du projet : Carl Boivin, agr., M. Sc., chercheur - IRDA
- Jérémie Vallée, agr., B. Sc., professionnel de recherche - IRDA
- Lélia Anderson, agr., M. Sc., professionnelle de recherche - IRDA
- Antoine Lamontagne, t.a., technicien agricole - IRDA
- Mick Wu, Ph. D., biostatisticien - IRDA
- Sébastien Rougerie-Durocher, M. Sc., agrométéorologue - IRDA
- Pierre-Olivier Martel, agr., conseiller en horticulture fruitière - DRSLSJ du MAPAQ
- Guy Marcil, gérant et responsable de la production - Bleuets Boréals Normandin

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Carl Boivin
IRDA
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8
418 643-2380, poste 430
carl.boivin@irda.qc.ca

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Anderson L., C. Boivin et J. Vallée. 2022. Mise l'essai d'une machine à vent comme méthode de protection contre le gel des fleurs dans le bleuets sauvage cultivé pour le marché de la transformation. 39 p.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

SOMMAIRE

FAITS SAILLANTS

- La performance d'une machine à vent (250H, Tow and Blow) comme méthode de contrôle du gel des fleurs a été évaluée en contexte de production commerciale de bleuets sauvages cultivés.
- La bleuetière hôte a subi 6 épisodes de gel durant la période de floraison et la machine a été actionnée à chacun de ceux-ci.
- Quatre de ces épisodes ont été de type radiatif et 2 ont été de type « gel/gelées », soit un mixte de conditions radiatives et convectives.
- Les inversions de températures (c.-à-d. différentiel entre 9 m et 0.20 m du sol), nécessaire à ce que l'opération de la machine ait un effet, ont été de faibles intensités (< 2.9°C) lors des nuits de « gel/gelées ».
- En marche, la machine a permis d'obtenir un gain de température de l'air au niveau des fleurs lors des nuits de gels radiatives, mais aucun gain lors des nuits de « gel/gelées ».
- Les plants plus près de la machine à vent ont passé moins de temps à des températures froides que ceux situés plus loin de la machine.
- Le rendement en fruits et le calibre de ces derniers ont été négativement affectés par une faible densité de ramets (dans la zone de récolte).
- La distance par rapport à la machine et la densité des ramets ont permis d'expliquer 46 % de la variation sur le rendement.
- Aucune relation n'a été établie entre la densité des ramets et la distance par rapport à la machine.
- Le déclenchement automatique de la machine est tributaire d'une consigne de température de l'air qui est validée avec une sonde de mesure qui est située à 1.5 m du sol dans le module d'opération.
- Il était attendu que la machine se mette en marche lorsque la température de l'air au niveau du sol atteignait 0 °C.
- La consigne utilisée (4 °C) n'a pas permis le déclenchement de la machine au moment souhaité dans 50 % des épisodes de gel radiatif. Un retard de 2 à 2.5 h a été observé entre le moment où 0 °C a été atteint au niveau des fleurs et le moment où la machine s'est mise en marche. Ainsi, pour la moitié des épisodes ayant un « bon » potentiel d'efficacité, la machine n'a pas été déployée de façon optimale.

HYPOTHÈSES FORMULÉES À LA SUITE DE CES RELATIONS

1. La couverture de protection offerte par la machine, même partielle, permet une protection suffisante pour avoir un impact positif sur le rendement en fruits.
2. L'augmentation du rendement, conséquent à la protection des fleurs contre le gel, témoigne d'un nombre de fleurs plus élevées ayant survécu au gel et qui ont ainsi pu produire des fruits.
3. Un nombre plus élevé de fruits, plutôt qu'un calibre plus élevé de ces derniers, explique le rendement plus élevé près de la machine.
4. D'autres facteurs que le gel des fleurs ont négativement affecté le rendement en fruits.
5. La performance de la machine à vent comme méthode de protection contre le gel des fleurs serait supérieure avec une sonde de mesure de la température de l'air située au niveau des fleurs.

TABLE DES MATIÈRES

1	Mise en contexte	1
2	Objectifs.....	3
2.1	Objectif général	3
2.2	Objectifs spécifiques.....	3
3	Méthodologie	4
3.1	Contexte où les essais ont été réalisés.....	4
3.1.1	Lieu	4
3.1.2	Description du système cultural	4
3.1.3	Période couverte	5
3.1.4	Marché.....	5
3.2	Collecte de données	5
3.2.1	Conditions météorologiques	5
3.2.2	Suivi de la culture	9
3.3	Méthode de protection	11
3.3.1	Principes généraux	11
3.3.2	Description technique de la machine	12
3.3.3	Conditions pour le déclenchement de la machine	12
3.4	Dispositif.....	13
3.4.1	Schéma des installations au site de l'essai	13
3.4.2	Mesure de la portée de la machine à vent.....	14
3.4.3	Analyses statistiques	14
4	Résultats	15
4.1	Suivi météorologique	15
4.1.1	Portrait général de la saison	15
4.1.2	Conditions météorologiques au site de l'essai	16
4.1.3	Température de l'air au niveau du couvert végétal	18
4.2	Portée de la machine.....	20
4.2.1	Stratification thermique de l'air	20
4.2.2	Impact sur la température de l'air au couvert végétal en fonction des conditions météo moyennes	20
4.3	Suivi de la culture	22
4.3.1	Stades phénologiques.....	22
4.3.2	Modélisation du rendement.....	25
4.3.3	Modélisation du calibre des fruits	26
4.4	Problématiques rencontrées	28
4.4.1	Consigne de départ de la machine	28
4.4.2	Brise-vents et portée de la machine.....	28
4.4.3	Brise-vents et bilan thermique	28
4.4.4	Autonomie de la machine.....	28
5	Interprétation des résultats et conclusion	29
5.1	Retour sur les objectifs du projet et les résultats attendus	29
5.1.1	La portée de l'effet de réchauffement selon les conditions d'opération.....	29
5.1.2	Le gain en réchauffement de l'air au niveau des fleurs selon la distance avec la machine	29
5.1.3	Diminution du dégât de gel aux fleurs	30
5.2	Conclusion	30
6	Annexe.....	31
7	Bibliographie.....	38

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Rendements moyens (t/ha) pour la production de bleuets sauvage cultivés selon la province entre 2015 et 2019 (adaptée de MAPAQ, 2022).	1
Figure 2. Emplacement du site où la machine à vent a été mise à l'essai.	4
Figure 3. Photo de la tour sur laquelle étaient installées les sondes pour le suivi de la stratification thermique de l'air. Du bas vers le haut : à 0.20, 3, 6 et 9 m.	6
Figure 4. Clé diagnostique des types de gels, selon Barclay (2008) et tel que présenté par MAPAQ (2014).	7
Figure 5. Exemples où l'indice de la densité des ramets attribué après la récolte mécanique a été de 2 (bonne) et de 8 (très mauvaise). Le carré noir pointillé représente la zone récoltée (approximativement).	9
Figure 6. Cueilleuse motorisée : (a) vue d'ensemble et (b) vue sur le peigne et les boîtes à bleuets.	10
Figure 7. Stratification thermique de l'air en fonction du moment de la journée pour (a) le jour et (b) le soir.	11
Figure 8. Schéma des installations au site où la performance de la machine à vent a été évaluée.	13
Figure 9. Données climatiques mensuelles pour 2021 et historiques (1971 à 2000) à la station de Normandin au Lac-Saint-Jean. Adaptée d'Environnement Canada (2022a).	15
Figure 10. Conditions météorologiques enregistrées à la station météo lors des épisodes de gel où la machine à vent a été déployée. Vitesse du vent à 3 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).	16
Figure 11. Portrait des températures et de la pluie au printemps 2021, du 1 ^{er} mai au 15 juin.	18
Figure 12. Portrait des températures de l'air (°C) mesurées à 0.20 m, 3, 6 et 9 m de hauteur par rapport au sol, à une distance de 56 m de la machine, du 1 ^{er} mai au 15 juin.	18
Figure 13. Températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	19
Figure 14. Température de l'air (°C) mesurée à 0.20, 3, 6 et 9 m de hauteur par rapport au sol à une distance de 56 m de la machine.	21
Figure 15. Évolution des degrés-jours calculés à partir du 17 mars selon la méthode « sinus simple » en base 0°C et avec une température optimale de 28°C (17 mars : 10 derniers cm de neiges mesurés par la station Saint-Prime). Les boîtes représentent des observations terrain faites sur les stades phénologiques.	23
Figure 16. Rendement en fruits (kg/ha) en fonction de la distance à la machine à vent et l'indice de densité, selon le modèle linéaire multiple obtenu.	26
Figure 17. Calibre en fonction de l'indice de densité selon le résultat du modèle retenu selon le modèle linéaire simple obtenu.	27
Figure 18. Capteur MX2201 (Onset) installé à la hauteur des fleurs pour le suivi de la température de l'air, photo prise à la suite des périodes de gels, 10 juin 2021. (Diamètre de la sonde : 18 mm).	31
Figure 19. Machine à vent, 13 mai 2021.	32
Figure 20. Suivi du stade de la culture, 10 mai 2021.	33
Figure 21. Suivi du stade de la culture, 21 mai 2021.	34
Figure 22. Suivi du stade de la culture, 1 ^{er} juin 2021.	35
Figure 23. Suivi du stade de la culture, 22 juillet 2021.	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Dates des épisodes de gel où la machine a été déclenchée au printemps 2021.	17
Tableau 2. Synthèse des conditions météorologiques et effets moyens de chacun des 6 déploiements de la machine à vent sur les températures minimales, les vents, les points de rosée, les couvertures nuageuses, les différentiels 9 m à 0.20 m et les gains de températures atteints.	17
Tableau 3. Résultats de la régression linéaire multiple sur le log (base 10) du rendement en fruits.	25
Tableau 4. Résultats de la régression linéaire multiple sur le log (base 10) du calibre (g/100 fruits).	27
Tableau 5. Degré d'efficacité des méthodes de lutte au gel printanier selon le type de gel tel que présenté par MAPAQ (2014).	37

1 MISE EN CONTEXTE

Au Québec, les rendements moyens et la productivité par hectare du bleuets sauvage ont progressé dans les dernières années, mais restent en deçà de la moyenne canadienne (MAPAQ, 2022). De 2015 à 2019, le rendement au Québec a augmenté de 27 % (avec 2.21 t/ha en 2019), mais cette hausse ne lui a pas permis de rattraper le niveau de rendement des autres provinces (Figure 1) (MAPAQ, 2022). Toutefois, l'écart avec la moyenne canadienne tend à s'amenuiser où ce dernier a été de 43 % inférieur en 2015, pour atteindre 26 % en 2019 (MAPAQ, 2022). La productivité par hectare (\$/ha), de son côté, tire moins de l'arrière.

L'amélioration des pratiques culturales, la maturité des bleuetières aménagées, en combinaison avec l'obtention d'un meilleur prix pour le bleuets grâce au positionnement de sa production sur les marchés (p. ex. production biologique, réduction d'utilisation d'intrants sur les fruits) a permis au Québec d'obtenir une meilleure productivité (\$/ha) dans les dernières années (MAPAQ, 2022). Néanmoins, des efforts peuvent encore être déployés pour atteindre des rendements plus élevés et rattraper ceux des provinces voisines du Québec qui sont assujettis à des conditions culturales très similaires aux nôtres.

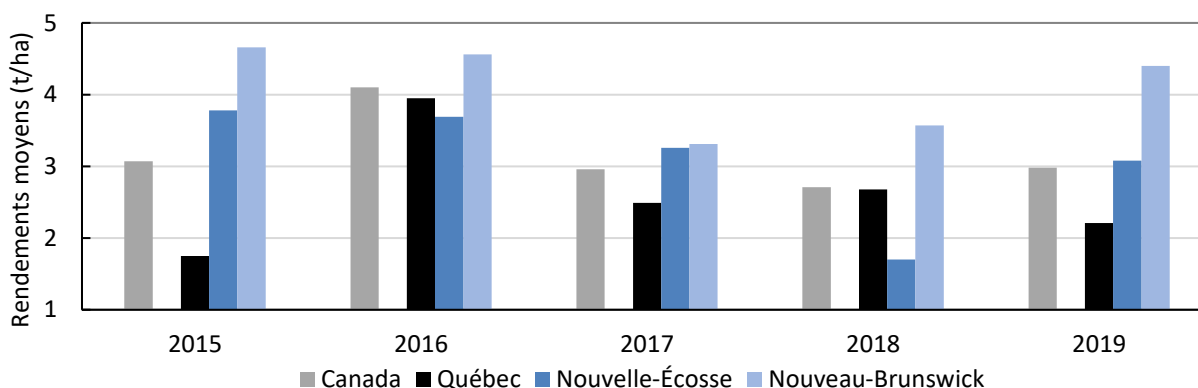


Figure 1. Rendements moyens (t/ha) pour la production de bleuets sauvage cultivés selon la province entre 2015 et 2019 (adaptée de MAPAQ, 2022).

Le gel printanier est un facteur qui provoque d'importantes fluctuations de rendement. Malgré une faible probabilité que le risque d'un synchronisme « fleur-gel » augmente en climat futur, le gel printanier affecte régulièrement le rendement de façon importante au Québec. Au Saguenay et au Lac-Saint-Jean, des gels printaniers tardifs ont causé des pertes totales en 1986 et 1998 ainsi que des pertes partielles en 1990, 1992, 2000 et 2003 (Boivin et coll., 2019). À cela s'ajoute l'épisode de synchronisme « fleur-gel » vécu au printemps dernier qui a représenté la première cause de dommage aux bleuetières du Saguenay–Lac-Saint-Jean pour l'année 2021 (Martel, 2022). Parmi les causes probables associées aux dommages ou pertes de rendement (c.-à-d. gel hivernal, gel printanier tardif, gel pendant la production des fruits, sécheresse, autres facteurs biotiques), le gel des fleurs, en plus d'une fréquence de 30 % des années, sur la période 1986 à 2005, est le seul facteur qui a causé des pertes totales (1986 et 1998). Les autres causes ayant entraîné des pertes « partielles » ou « importantes » (Boivin et coll., 2019).

Pour la période 1981 à 2010, le nombre de jours touchés par un synchronisme « fleur-gel » varie entre de 1.0 à 1.9 (Boivin et coll., 2019) au Québec. En climat futur ce synchronisme pourrait varier entre 0.0 et 0.9 jour (scénario inférieur) et entre 1.0 et 2.9 jours (scénario supérieur) (Boivin et coll., 2019). Il n'est donc pas exclu que ce synchronisme néfaste soit en hausse avec les changements climatiques.

Peu d'études se sont intéressées à la protection contre le gel des fleurs du bleuet sauvage cultivé au Québec, quoique l'irrigation soit une méthode de protection qui est un peu utilisée. Les méthodes de protection contre le gel sont beaucoup mieux documentées pour d'autres cultures comme la vigne, la canneberge ou la fraise. Au Québec, l'utilisation de machine à vent est une pratique principalement observée dans la vigne. Un essai avec une machine à vent a déjà été réalisé pour la protection du gel printanier en contexte de production de bleuets sauvages au Saguenay-Lac-Saint-Jean (Agrinova, 2015), mais à notre connaissance les résultats de cette étude n'ont pas été publiés ou sont tout au moins difficilement accessibles au milieu.

2 OBJECTIFS

2.1 Objectif général

Mesurer la performance d'une machine à vent dans différentes conditions météorologiques dans un contexte de protection contre le gel des fleurs au printemps dans la culture du bleuet sauvage cultivé récolté pour le marché de transformation.

2.2 Objectifs spécifiques

- 1) Mesurer la portée de l'effet de réchauffement de l'air selon les conditions d'opération.
- 2) Mesurer le gain en réchauffement de l'air au niveau des fleurs selon la distance avec la machine à vent.
- 3) Déterminer si la machine à vent permet de diminuer les dégâts de gel causés aux fleurs.

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Contexte où les essais ont été réalisés

3.1.1 Lieu

Les essais terrain ont été réalisés en contexte de production commerciale chez Bleuets Boréals Normandin, située à Normandin, au Lac-Saint-Jean (48.783120°, -72.552329°). La Figure 2, représente l'emplacement du site au Québec et de la machine à vent sur la ferme. La machine était située à 100 m à l'est de la rivière Ashuapmushuan. Le site d'essai s'étendait sur une zone circulaire de 138 m de rayon. La largeur maximale du site a été limitée par la présence de haies brise-vent situées à respectivement 132 m (au nord) et 126 m (au sud) de la machine. Les haies brise-vent étaient d'une hauteur d'environ 7 à 8 m.

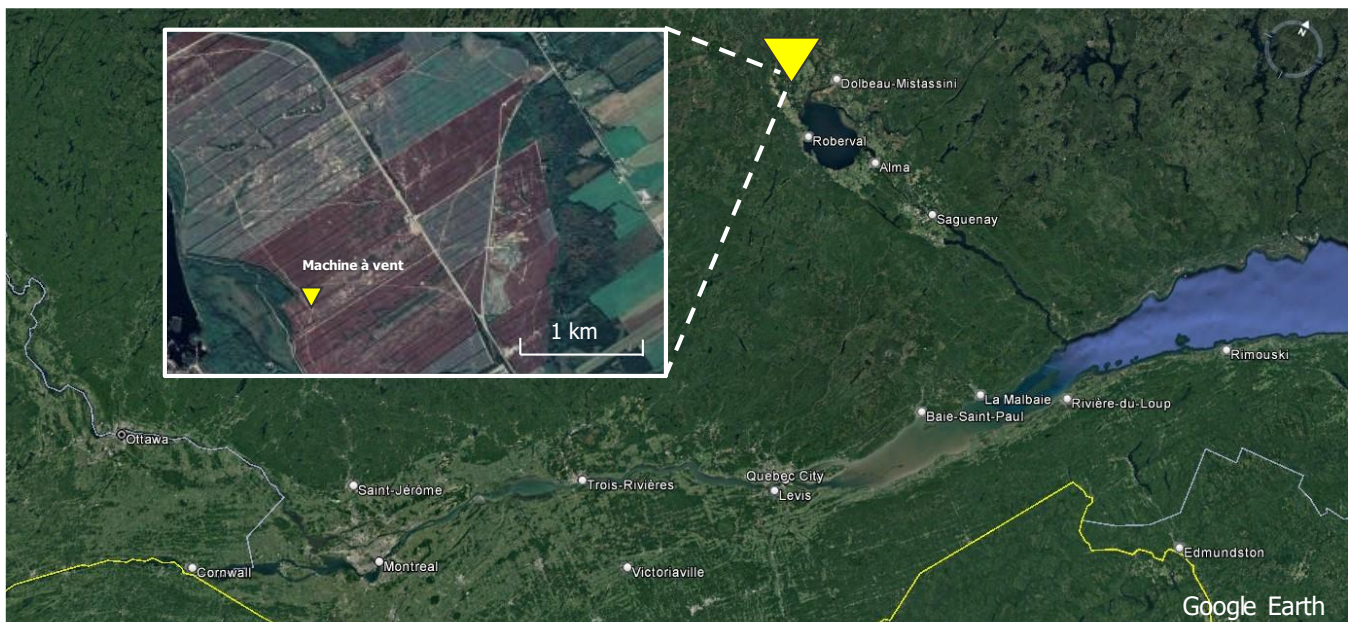


Figure 2. Emplacement du site où la machine à vent a été mise à l'essai.

3.1.2 Description du système cultural

À la ferme où les essais ont été réalisés, le cycle de production débute par une année en végétation et se poursuit par une seconde en production où la culture est fauchée au ras du sol quelque temps après la récolte. Cette pratique culturale évite que la culture produise des tiges ramifiées qui sont favorables à une croissance végétative qui affecte négativement la production de fruits. L'essai tenait place sur une parcelle en année de production. La fauche la plus récente datait du printemps de l'année précédente, soit à la mi-mai 2020.

Cette bleuetière a été aménagée vers 1965. La ferme a eu une stratégie de pollinisation qui a été composée de ruches d'abeilles, de mégachiles et de quad de bourdons. En 2021, 1325 ruches ont été installées sur les 700 acres en production (moyenne de 1.85 ruche/acre). Plus près du site d'essai, la pollinisation a principalement été assurée par des abeilles et des mégachiles. À 300 m de la machine à vent, 48 ruches d'abeilles ont été sur place du 22 mai au 17 juin. À 70 m de la machine, un dôme à mégachiles a été présent, néanmoins une forte mortalité a été observée après la forte gelée du 29 mai.

3.1.3 Période couverte

Cet essai s'est déroulé du 28 avril jusqu'à la récolte le 12 août. Le printemps hâtif de 2021 a provoqué l'apparition des fleurs à un moment où les risques de gels étaient encore élevés. Le déploiement de la machine à vent pour la protection des fleurs contre le gel s'est fait durant cette période. Elle a été en fonction, lors des nuits de gels ayant eu cours du 13 au 29 mai 2021.

3.1.4 Marché

Le marché visé pour les bleuets produits est celui de la transformation.

3.2 Collecte de données

3.2.1 Conditions météorologiques

Une station météorologique a été installée, sur la ferme, à 2 km de la machine à vent (48.793232°, -72.547766°). La température et l'humidité relative de l'air (HC-S3, Rotronic), la radiation solaire (LI200S, Li-Cor), la vitesse et la direction du vent (05103, R.M. Young), ainsi que la pluviométrie (TR-525M, Texas Electronics) ont été mesurées en continu et enregistrées par un acquiiseur de données (CR1000, Campbell Scientific) relié à modem cellulaire (IPn3Gb, Microhard Systems).

3.2.1.1 Point de rosée

Le calcul du point de rosée a été déterminé à partir de la table des pressions de saturation de vapeur. Dans un premier temps, la pression de saturation à température in situ (P_{sat}) a été identifiée. Ce P_{sat} obtenu a ensuite été multiplié par l'humidité relative in situ pour calculer la pression de la vapeur d'eau (P_{vap}). Cette dernière a permis d'identifier le point de rosée ($T_{rosée}$). La détermination de $T_{rosée}$ et de P_{sat} s'est fait par interpolation dans la table des pressions de saturation de vapeur d'eau. Les valeurs de température et d'humidité relative qui ont été utilisées sont celles mesurées par les stations météorologiques in situ.

3.2.1.2 Suivi de la température de l'air dans le système cultural

Le suivi de la température de l'air a été assuré par des capteurs (MX2201, Onset) installés sur des supports en bois à la hauteur des fleurs (à 20 cm du sol) (Figure 18). Ces capteurs ont un diamètre de 18 mm et une épaisseur de 17 mm. Ils sont munis d'un enregistreur intégré de données et la mesure de la température de l'air s'est faite toutes les 5 minutes. Puisque les épisodes de gel étaient prévus la nuit, les sondes ont été installées sans abri solaire.

3.2.1.3 Stratification thermique de l'air

Le suivi de la température de l'air a été effectué à 3, 6 et 9 m du sol avec des sondes à thermistance (109, Campbell Scientific). Les sondes ont été installées sur une tour métallique de 9 m (Figure 3). Pour la température de l'air au niveau des fruits, la moyenne des deux sondes de températures (MX2201, Onset) les plus près de la tour (et à 56 m de la machine) ont été utilisées, car il y a eu un problème technique avec la sonde située à 20 cm. Les données ont été enregistrées aux 15 minutes avec un acquiiseur (CR300, Campbell Scientific) relié à modem cellulaire (IPn3Gb, Microhard Systems). La tour était située à 56 m de la machine afin d'être influencée par le déploiement de celle-ci (Figure 3).

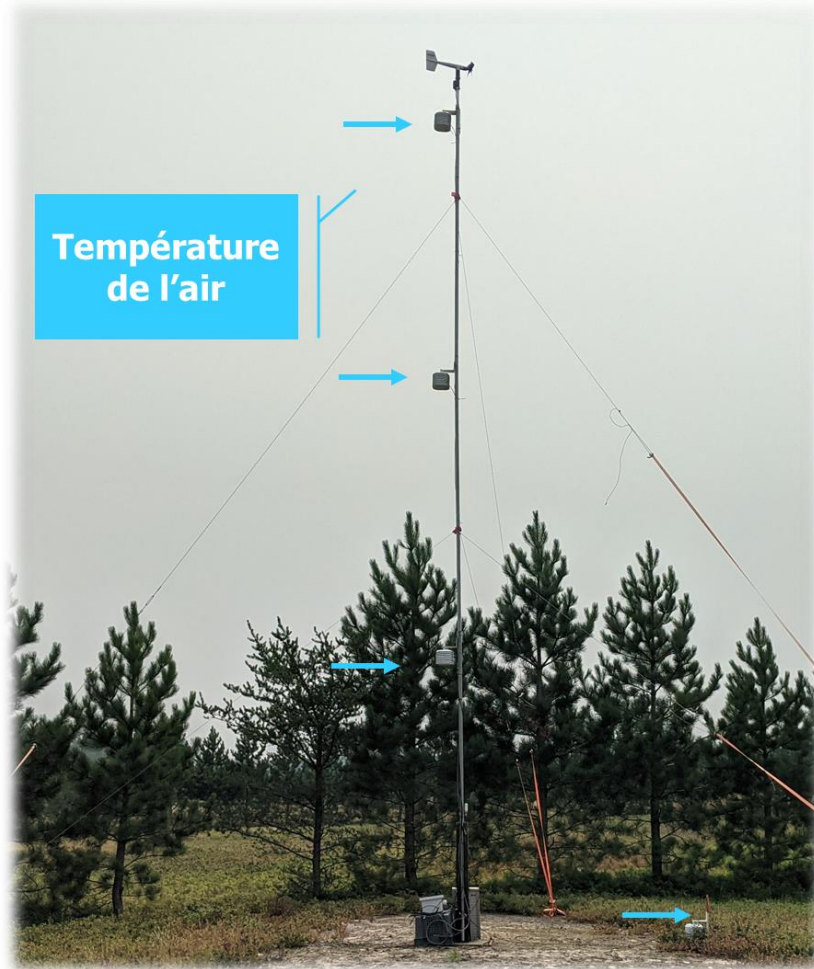


Figure 3. Photo de la tour sur laquelle étaient installées les sondes pour le suivi de la stratification thermique de l'air. Du bas vers le haut : à 0.20, 3, 6 et 9 m.

3.2.1.1 Caractérisation des types de gel

L'identification du type de gel en présence s'est appuyée sur les données suivantes : la température de l'air à la hauteur des fleurs, la vitesse des vents, le point de rosée et la couverture nuageuse. Le type de gel a été identifié via la clé diagnostique (Figure 4) des types de gels selon Barclay (2008) et telle que présentée dans différentes sources d'informations destinées au secteur du bleuet sauvage cultivé (MAPAQ, 2014; SPQB, 2017).

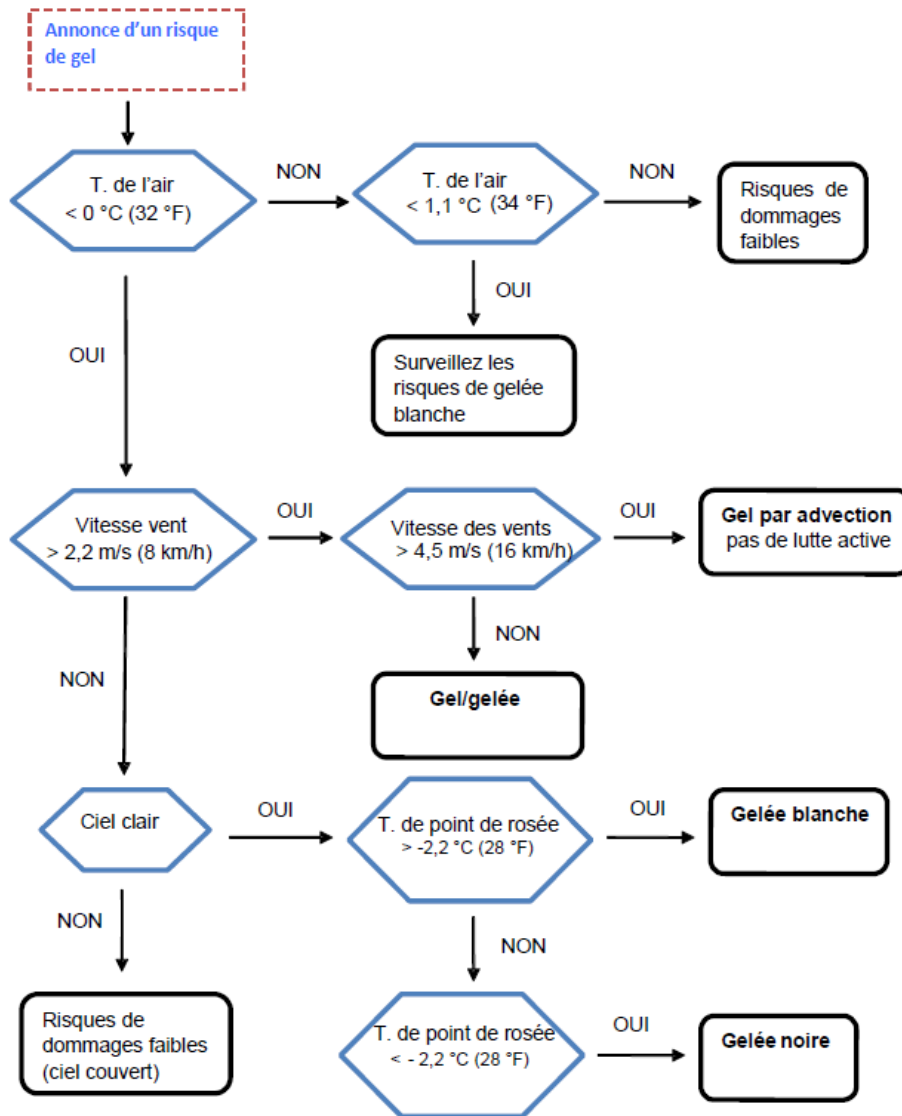


Figure 4. Clé diagnostique des types de gels, selon Barclay (2008) et tel que présenté par MAPAQ (2014).

3.2.1.1 Couverture nuageuse

Les données de couverture nuageuses sont issues de réanalyses. Les réanalyses sont pratiquement des données modélisées qui assimilent des observations de stations météorologiques, radars et satellites pour faire une « capture » de l'atmosphère. Ces données ont été extraites en données « horaires » et sont issues d'ERA5 (Hersbach et coll., 2020).

Afin de caractériser objectivement l'état clair ou nuageux du ciel, des critères de choix ont été fixés sur (a) le pourcentage de couverture nuageuse du ciel et (b) la hauteur des nuages.

- a) **Premier critère** : Toute nuit ayant un couvert nuageux moyen inférieur à 25 % a été considérée comme une nuit claire. Un tel critère est utilisé dans d'autres études comme dans Dai et coll. (1999).
- b) **Second critère** : Lorsque le couvert nuageux est supérieur à 25 %, un ciel où la hauteur des nuages est < 5 km a été considéré comme étant couvert, alors qu'un ciel où la hauteur des nuages est > 5 km a été considéré comme étant clair.

Ce second critère se base sur l'étude de Viúdez-Mora et coll. (2015) où il est démontré qu'un nuage bas contribue à une protection contre le « froid » dû à l'effet du radiatif du nuage de 50 W/m^2 . Parallèlement, 5 W/m^2 par km de gain en altitude seraient perdus. Ainsi, après les 5 premiers km de la surface de la Terre, une diminution de 50 % de la protection due à l'effet du radiatif du nuage serait perdue.

Bien que l'état nuageux du ciel se caractérise en réalité avec des variables continues, donc de façon beaucoup plus nuancée qu'avec les critères fixés ci-dessus, l'établissement de ces critères a néanmoins permis de faire un choix objectif, sur l'état nuageux du ciel, et a permis une utilisation de la clé diagnostique (Figure 4).

3.2.1.2 Prévisions

Bien que la machine à vent ait été déployée en mode « automatique », les prévisions de gel émises par Environnement Canada ont été suivies quotidiennement. Lors d'un avertissement de gel (température < $0 \text{ }^\circ\text{C}$), la personne-ressource à la ferme allait vérifier l'état de la machine pour s'assurer que le réservoir de diesel soit plein et que le mode de déclenchement automatique soit opérationnel.

3.2.2 Suivi de la culture

3.2.2.1 Stades phénologiques

Suivi du stade de développement

Afin de s'assurer de déployer la machine durant la période de floraison, le stade de développement a fait l'objet d'un suivi lors des visites de l'équipe de l'IRDA, ainsi qu'à distance à l'aide des collaborateurs au projet (Gestionnaire de la ferme et Professionnel du MAPAQ). Le développement de la culture a été fait à 6 reprises, soit les : 28 avril, 10 mai, 18 mai, 21 mai, 1^{er} juin, et 10 juin.

Simulation degrés-jours

Le calcul des degrés-jour s'est effectué à l'aide du logiciel CIPRA (AAC, 2021). Le calcul des degrés-jours a été initié à partir de la dernière date avec 10 cm neige au sol, car ce modèle phénologique est plus précis que celui qui utilise le 1^{er} mars comme point de départ (Boivin et coll., 2019). Une température de base de 0°C et une température optimale de 28°C ont été utilisées. Les données de la station météorologique d'Environnement et ressources naturelles Canada la plus près du site (Station Normandin : 48.84°Nord, -72.55°Ouest) ont été importées (Environnement Canada, 2022b) dans le logiciel CIPRA (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2022) pour alimenter le modèle. Le 17 mars a été retenu comme la date du dernier 10 cm et elle a été estimée à partir de la station météorologique d'Environnement et ressources naturelles Canada la plus près du site qui fournit ce type de donnée (Station Saint-Prime : -72.42° Nord, 48.62° Ouest).

3.2.2.2 Densité des ramets

Afin de prendre en compte l'hétérogénéité entre les zones de récolte due à une densité des ramets très variable, un indice de densité a été utilisé. Cet indice a été attribué selon une évaluation visuelle réalisée par le même observateur sur l'ensemble du site après la récolte. Un entier variant entre 1 et 9 (1= très bonne densité, 9 = presque aucun ramets présents) a été attribué à chaque zone de récolte. Deux exemples d'indice de densité sont présentés à la Figure 5.



Figure 5. Exemples où l'indice de la densité des ramets attribué après la récolte mécanique a été de 2 (bonne) et de 8 (très mauvaise). Le carré noir pointillé représente la zone récoltée (approximativement).

3.2.2.3 Rendement en fruits et calibre

La récolte des fruits a été effectuée le 12 août. Le rendement en fruits a été mesuré sur les transects reliant deux sondes de température (voir un exemple à la Figure 8). La récolte a été effectuée avec une cueilleuse motorisée qui récolte sur une largeur de 151 cm (Figure 6). Afin de reporter les rendements selon une unité de surface, la longueur des zones récoltées a été mesurées après le passage de la machine. Le poids frais des fruits a été mesuré directement au champ à l'aide d'une balance électronique (Kilotech, KPS-2). Aussi mesuré au champ, le calibre des fruits qui a été déterminé en pesant un sous-échantillon constitué de 100 fruits.

a) Cueilleuse motorisée



b) Peigne et boîtes à bleuets



Figure 6. Cueilleuse motorisée : (a) vue d'ensemble et (b) vue sur le peigne et les boîtes à bleuets.

3.3 Méthode de protection

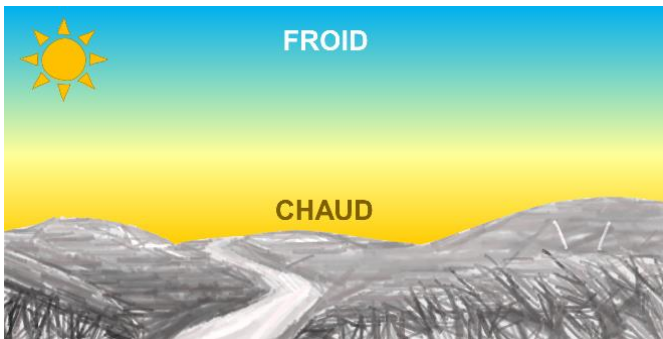
3.3.1 Principes généraux

Il y a trois types de gels : 1) l'advection, 2) le radiatif et 3) le « gel/gelée » qui est une combinaison entre les deux précédents gels. Le type de gel printanier le plus courant dans les bleuétières du Québec serait le radiatif. Ce type de gel est caractérisé par un ciel clair durant la nuit, des vents très faibles voir absents et une inversion de température (MAPAQ, 2014). Lorsque des conditions diurnes ont permis de réchauffer le sol, et qu'à la suite du coucher du soleil, le sol perd sa chaleur par radiation, une inversion de température peut se produire. À ce moment, l'air chaud monte dans le ciel alors que l'air froid, plus dense et plus lourd, s'accumule au sol. Cela est vrai pour les terrains plats alors que sur les terrains plus accidentés, l'air se draine dans le sens de la pente (Bellemare et coll., 2017).

Le principe de fonctionnement de la machine à vent est de rabattre la masse d'air chaud qui est située en hauteur vers le sol (Figure 7). Cette méthode permettrait un gain de température de l'air au sol équivalent à 50 % de l'écart de température entre la couche d'air en hauteur celle au niveau du sol (Bellemare et coll., 2017).

D'un autre côté, les gels de type advection sont caractérisés par un ciel clair ou nuageux, des vents forts qui sont supérieurs à 16 km/h (MAPAQ 2014). En absence d'inversion de température, le brassage de l'air dans ces conditions ne permet pas de gain de température de l'air au niveau des fruits. Comme l'efficacité de la machine à vent s'appuie sur une inversion de température, son efficacité en condition advective devient très limitée, voire nulle.

a) Conditions diurnes



b) Conditions nocturnes

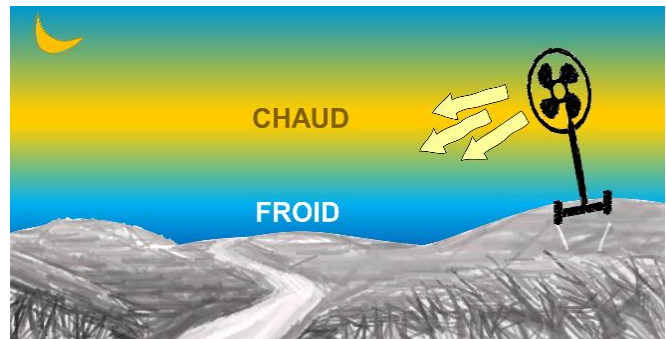


Figure 7. Stratification thermique de l'air en fonction du moment de la journée pour (a) le jour et (b) le soir.

3.3.2 Description technique de la machine

La machine à vent (Figure 19) (250H, Tow and Blow) est constituée d'un ventilateur axial, à 5 pales surdimensionnées, hissées sur un bras hydraulique à une hauteur pouvant aller jusqu'à 8.5 m du sol. L'entraînement du ventilateur est mu par un moteur diesel développant 17,6 kW. Le ventilateur se déplace sur un axe de 360° et souffle l'air à 83 km/h suivant une trajectoire légèrement inclinée vers le sol (ajustable en 1 et 14° sous l'horizontale). La machine à vent peut être actionnée manuellement ou automatiquement selon une consigne de départ qui s'appuie sur une valeur de température de l'air mesurée au niveau du boîtier de commande. La sonde de température a été ajustée pour être représentative de la température de l'air à la hauteur des fruits. L'appareil possède un réservoir de diesel qui lui permet d'avoir une autonomie théorique de 12 heures.

3.3.3 Conditions pour le déclenchement de la machine

Bien que l'efficacité de la machine dépende entre autres de la présence d'une inversion de température, celle-ci a été programmée en mode « déclenchement automatique ». La machine se déclenchait donc à toutes les fois que la « température critique » était atteinte. L'utilisation du mode « automatique » permettait ainsi de tester son efficacité, et de tester l'impact du déploiement dans une variété de conditions météorologiques printanières.

Comme la consigne pour la température critique de déclenchement devait être attribuée à une sonde située à 1.5 m du sol, une température de déclenchement supérieure à 0°C a été attribuée. Une consigne de déclenchement de 4°C a ainsi été choisie.

3.4 Dispositif

3.4.1 Schéma des installations au site de l'essai

La Figure 8 représente le schéma du site où la performance de la machine à vent a été évaluée. Les carrés bleus représentent les emplacements où les sondes de température ont été installées à la hauteur des fruits. Telle qu'illustrée, la machine à vent était située au centre du site et la tour à 56 m de la machine. Les sondes de températures étaient positionnées sur des rayons équidistants autour de la machine. La disposition des brise-vents a limité le placement de deux sondes de température à la distance visée (haut et bas du dispositif). Les sondes de températures avec un « X » n'ont pas été utilisées pour le calcul des moyennes en raison de problématiques liées à leur emplacement (discuté aux sections 4.4.2 et 4.4.3).

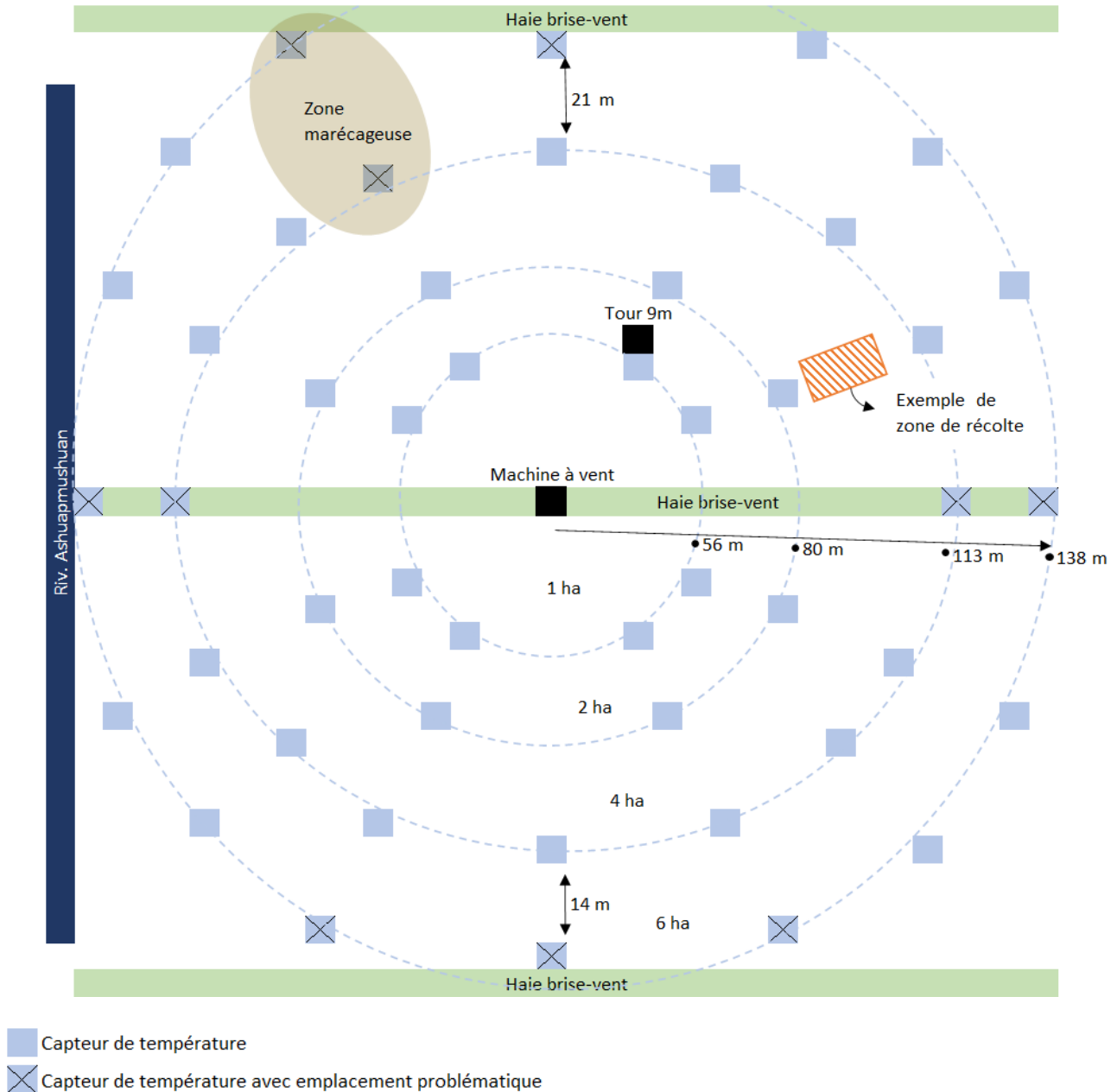


Figure 8. Schéma des installations au site où la performance de la machine à vent a été évaluée.

3.4.2 Mesure de la portée de la machine à vent

Selon le fabricant, la portée maximale de la machine est d'environ 100 m, ce qui permettrait de protéger une superficie de 3 à 4 ha (Tow and Blow, 2021). Afin de vérifier la portée de la machine, des sondes de températures ont été disposées dans des rayons équidistants à la machine à vent de 56, 80, 113 et 138 m (Figure 8). Ces distances représentent une superficie couverte circulaire de 1, 2, 4 et 6 ha, respectivement. Les sondes à 138 m représentent les sondes « hors portée » de la machine.

3.4.3 Analyses statistiques

Le logiciel R a été utilisé pour les analyses statistiques. Une régression linéaire multiple a été utilisée pour modéliser le degré d'influence de la distance à la machine et de la densité des ramets sur le rendement (expliqué à la section 3.2.2.2). Une régression linéaire simple a été utilisée pour modéliser l'effet sur le calibre de la densité des ramets. Les variables réponses ont été analysées avec une transformation logarithmique.

4 RÉSULTATS

4.1 Suivi météorologique

4.1.1 Portrait général de la saison

Au Québec, l'année 2021 a été marquée par un début d'année doux et plus sec que la normale. Il s'agit du troisième début d'année le plus doux en 100 ans, ce qui a laissé le couvert de neige le moins chargé en eau en 10 ans sur la province (MELCC, 2022a). À la fin mars, la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean a atteint un déficit d'équivalent en eau provenant de la neige de 124 mm par rapport à la période 1963-2015. La faible quantité de neige n'a cependant pas causé de dommage de gel hivernal aux bleuetières en raison des températures chaudes présentes à la fin de l'hiver.

Les chauds mois d'avril et mars ont laissé la place à un printemps hâtif qui a causé une floraison hâtive du bleuet sauvage cultivé. Des périodes de gels ont toutefois eu lieu à la fin mai (Figure 11). Ces conditions ont mené à un synchronisme entre la « présence des fleurs » et l'occurrence de « gel » qui a touché la majorité des superficies de bleuets au Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les mois de juin et juillet ont été près des normales climatiques. Toutefois, un gel estival est survenu le 8 juillet. La saison s'est terminée avec le mois d'août le plus chaud, et à quelques millimètres du plus sec, en au moins 100 ans pour le sud du Québec (MELCC, 2022b). La Figure 9 illustre les données climatiques mensuelles pour 2021 et historiques (1971 à 2000) à Normandin au Lac-Saint-Jean.

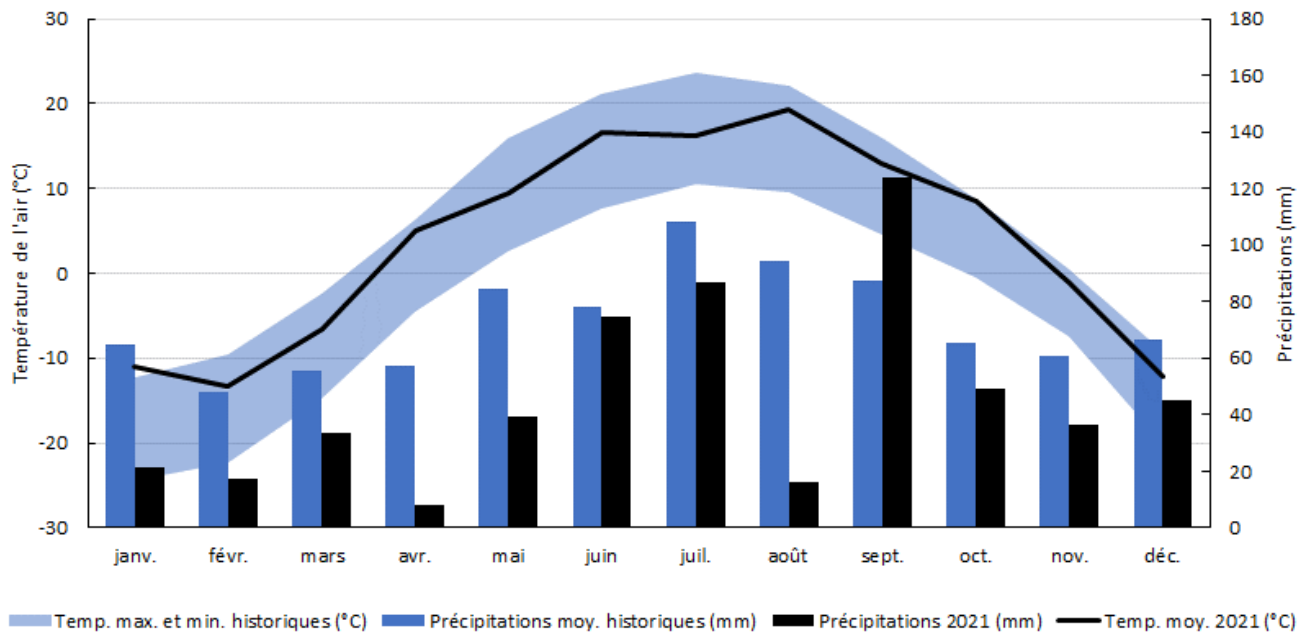


Figure 9. Données climatiques mensuelles pour 2021 et historiques (1971 à 2000) à la station de Normandin au Lac-Saint-Jean. Adaptée d'Environnement Canada (2022a).

Ces conditions climatiques ont eu pour conséquences de réduire les rendements totaux et de grandement réduire le calibre et la qualité des fruits (FADQ, 2022). Au Lac-Saint-Jean, un total de 194 dossiers ont reçu une indemnité sur les récoltes pour un total versée de 9 262 807\$ (Martel, 2022). De plus, bien que le rendement moyen annuel provincial 2016-2020 soit de 94 M lb, ce n'est que le tiers de ce rendement qui a été atteint en 2021 pour Québec, à 36.3 M lb (Martel, 2022).

4.1.2 Conditions météorologiques au site de l'essai

Les conditions météorologiques enregistrées à la station météo près du site d'essai sont représentées pour chacun des 6 épisodes de gels à la Figure 10. Dans la majorité des cas, les conditions journalières étaient caractérisées par des températures maximales près de 15°C, à l'exception des épisodes 4 et 5. La majorité des épisodes étaient caractérisés par des vents atteignant des vitesses maximales moyennes de plus de 15 km/h sur une base horaire (épisodes 1, 3, 4 et 5). Les épisodes 2 et 6 étaient toutefois moins venteux. De façon générale, les nuits étaient moins venteuses que les journées. Aucune précipitation n'a été enregistrée durant ces 6 épisodes de gel.

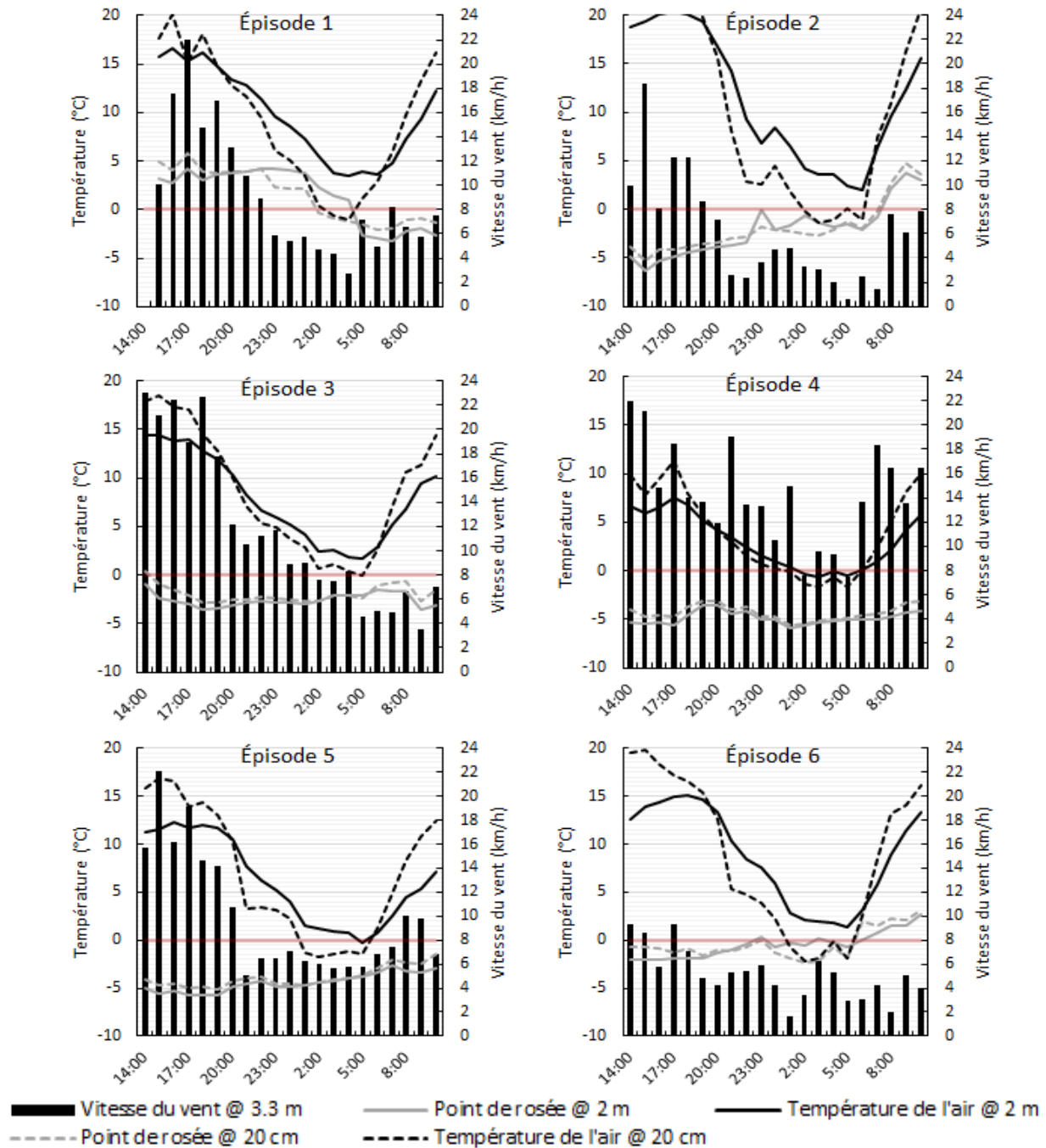


Figure 10. Conditions météorologiques enregistrées à la station météo lors des épisodes de gel où la machine à vent a été déployée. Vitesse du vent à 3 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

Le Tableau 1 présente les dates des épisodes de gel pour lesquelles la machine a été déclenchée. La machine a été déployée lors de 6 épisodes de gels du 13 mai au 29 mai. Le Tableau 2 fait la synthèse des conditions météorologiques et effets moyens atteints aux 6 déploiements. Après la période de floraison, des gels légers ont eu lieu les 10, 11, 12 juin, et le 8 juillet (Figure 11), mais la machine n'a pas été déployée étant donné que la période visée (protection des fleurs) était terminée.

Tableau 1. Dates des épisodes de gel où la machine a été déclenchée au printemps 2021.

Épisode de gel	Nuit	Durée (h)
1	13 au 14 mai	6.8
2	14 au 15 mai	4.0
3	23 au 24 mai	3.2
4	27 au 28 mai	6.6
5	28 au 29 mai	6.8
6	29 au 30 mai	5.3

Tableau 2. Synthèse des conditions météorologiques et effets moyens de chacun des 6 déploiements de la machine à vent sur les températures minimales, les vents, les points de rosée, les couvertures nuageuses, les différentiels 9 m à 0.20 m et les gains de températures atteints.

Ép.	Température minimale atteinte par rayon ¹ (°C)				Vents (km/h)		Point rosée (°C)	Couverture nuageuse nocturne ³			Type de gel (efficacité potentielle de la machine à vent ⁵)	Diff. ⁶ 9 m à 0.20 m (°C)	Gain moyen de température par distance ⁷ (°C)		
	56 m	80 m	113 m	138 m	Jour ²	Nuit ³	Nuit ³	Couv. (%)	Haut. (km)	Ciel ⁴			56 m	80 m	113 m
1	-1.4	-2.6	-2.9	-4.0	16	7	1.3	11.8	3.0	C	Gelée blanche (***)	6.2	2.6	1.4	0.9
2	-1.4	-1.9	-2.1	-2.3	11	4	-2.1	20.8	2.9	C	Gelée blanche (***)	-	1.7	0.8	0.2
3	-0.9	-1.2	-1.1	-1.2	20	8	-2.5	0.1	n.a.	C	Gel/gelée (*)	2.9	0.6	0.1	0.3
4	-2.5	-2.6	-2.4	-2.6	17	12	-5.1	33.6	8.1	C	Gel/gelée (*)	1.6	0.2	0.0	0.1
5	-4.7	-5.5	-5.5	-5.7	17	6	-4.2	67.1	6.5	C	Gelée noire (**)	4.6	1.1	0.2	0.4
6	-2.9	-3.2	-3.3	-3.6	7	4	-0.2	0	n.a.	C	Gelée blanche (***)	4.7	1.0	0.4	0.1

¹ Température minimale atteinte avec la moyenne des sondes équidistantes à la machine durant la nuit de gel. Les températures plus froides sont représentées par une teinte de bleue plus foncée.

² De midi au crépuscule.

³ Du crépuscule à l'arrêt de la machine (en excluant les données mesurées après le lever du soleil).

⁴ C = Ciel clair. Ciel clair ■ (teinte gris pâle), ciel couvert ■ (teinte gris foncé).

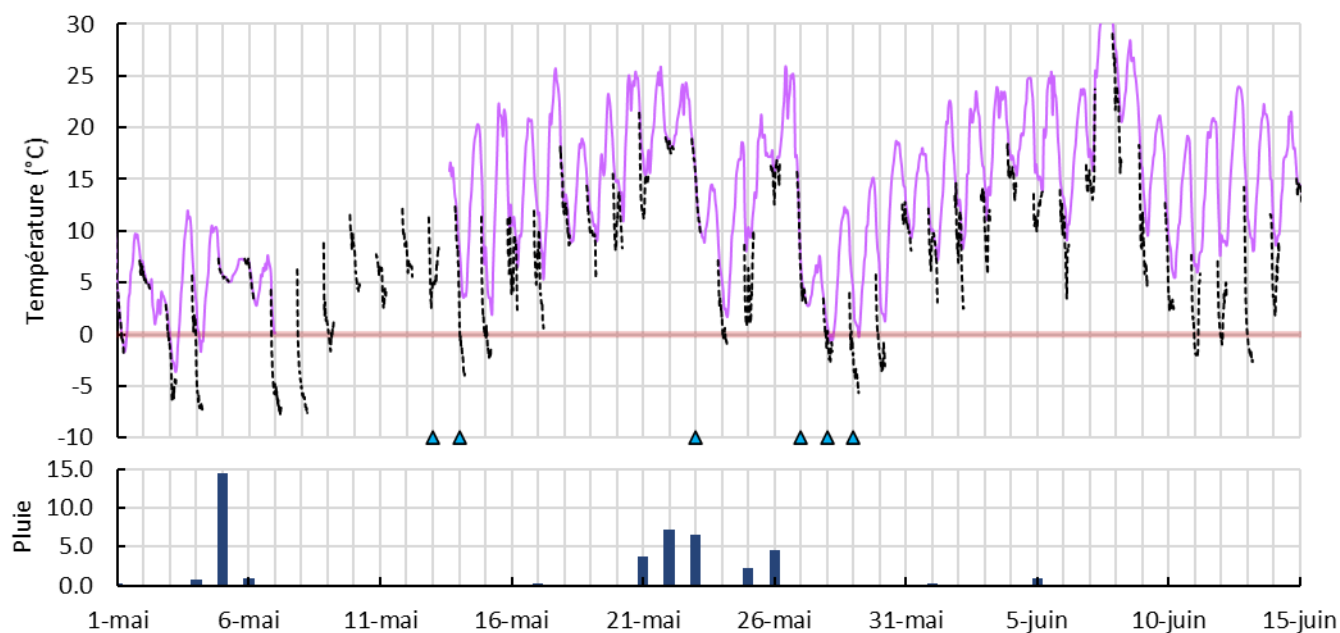
⁵ Type de gel selon la clé diagnostique des types de gel (Barclay, 2008; MAPAQ, 2014). Entre parenthèse, efficacité potentielle de la machine à vent selon MAPAQ (2014) : *** = très efficace, ** = efficace, * = efficacité limitée. La clé des efficacités potentielles est présentée à la Figure 4 et au Tableau 5.

⁶ Différentiel de température moyen entre 9 m et 0.20 m du sol, durant la période de déploiement (en excluant les données mesurées après le lever du soleil). Pour le 2^e épisode, les données sont manquantes en raison d'un problème technique.

⁷ Gain de température (°C) moyen par rapport à la zone non protégée (sondes à 138 m de la machine) durant le déploiement de la machine. Les 30 premières minutes après le déclenchement de la machine et les données mesurées après le lever du soleil sont exclues. Les températures plus chaudes sont représentées par une teinte plus foncée.

- Donnée manquante.

n.a. Non-applicable.



— 2 m (à la station météo du site) - - - - - 0.20 m (à 138 m de la machine) ▲ Déploiement de la machine ■ Pluie (mm)

Figure 11. Portrait des températures et de la pluie au printemps 2021, du 1^{er} mai au 15 juin.

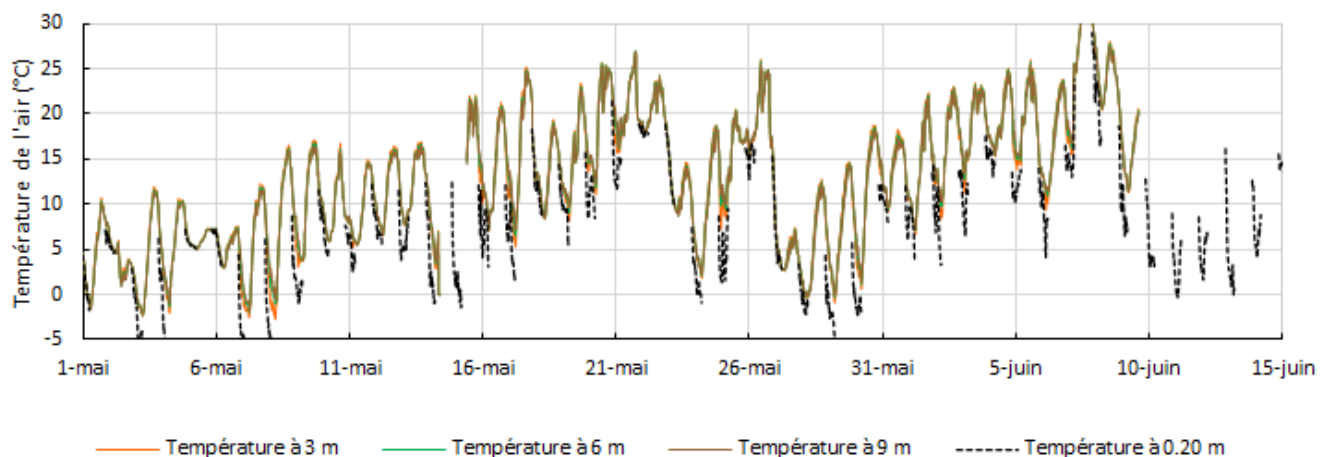


Figure 12. Portrait des températures de l'air (°C) mesurées à 0.20 m, 3, 6 et 9 m de hauteur par rapport au sol, à une distance de 56 m de la machine, du 1^{er} mai au 15 juin.

4.1.3 Température de l'air au niveau du couvert végétal

Les températures de l'air mesurées à la hauteur des fleurs par les sondes situées à 138 m de la machine ont été utilisées pour caractériser les conditions en zones non protégées. Les températures moyennes mesurées où ces sondes sont représentées par la ligne mauve à la Figure 13. L'épisode 3 a été le plus doux avec un minimum moyen de 1.2°C. L'épisode 5 a été le plus froid où une température minimale de -5.7°C a été atteinte. Les températures les plus basses mesurées lors des épisodes 2, 3, et 6 ont été de, respectivement, -2.3, -2.6, et -0.6°C. Pour la majorité des épisodes (1, 3, 4 et 5), le moment le plus froid a été juste avant le lever du soleil. Pour les épisodes 2 et 6, le moment le plus froid a cependant eu lieu au courant de la nuit.

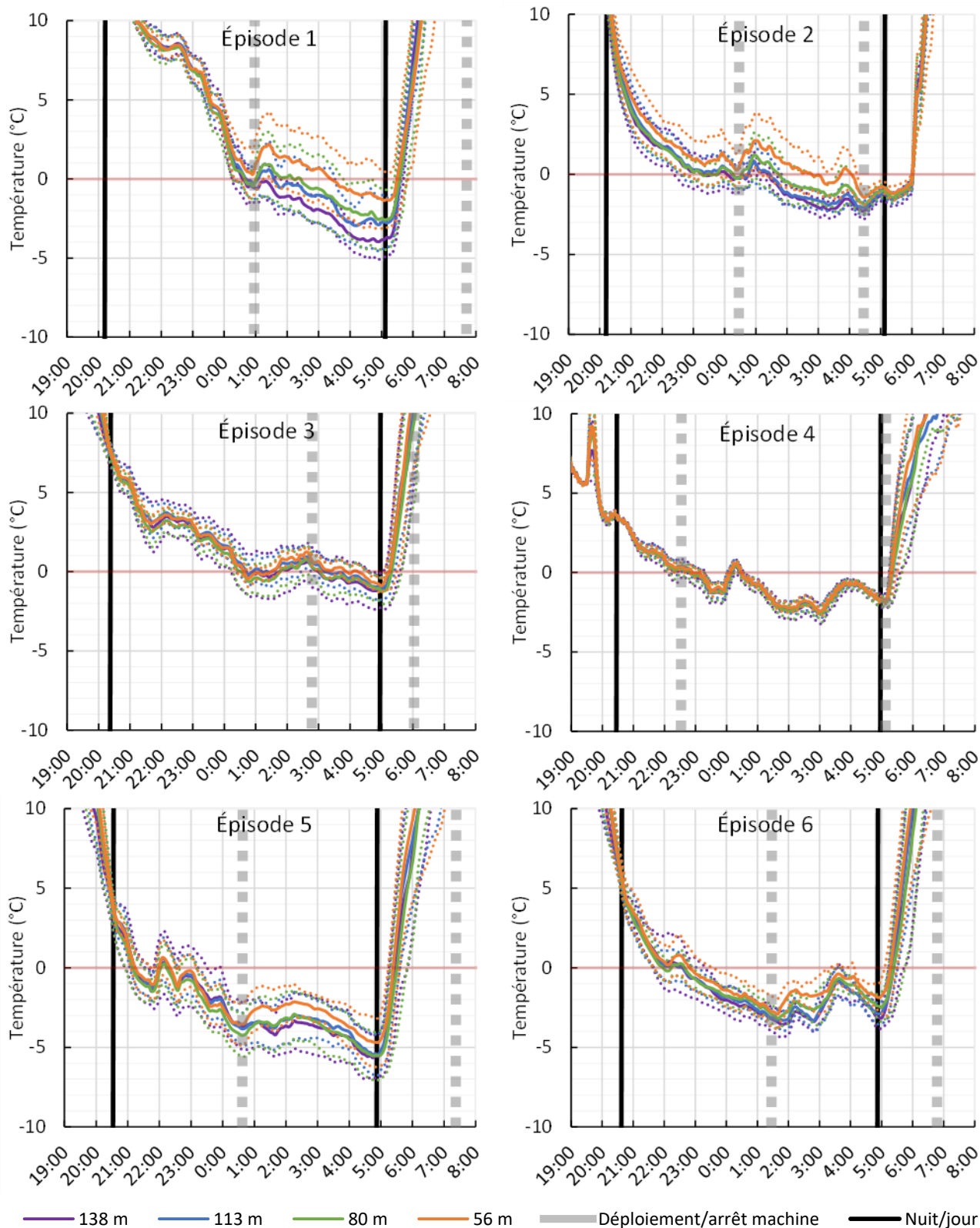


Figure 13. Températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

4.2 Portée de la machine

4.2.1 Stratification thermique de l'air

La Figure 12 illustre le portrait de la stratification thermique du site au printemps 2021, du 1er mai au 15 juin. La température de l'air à 0.20, 3, 6 et 9 m est illustrée pour les 6 épisodes de gel à la Figure 14. Sur les graphiques présentés sur cette figure, la zone saturée en brun pâle représente la différence entre la température de l'air mesurée à 9 m est celle mesurée dans la végétation à 20 cm du sol. Cette zone saturée permet d'apprécier l'amplitude des inversions de températures qui ont eu lieu. Les données de l'épisode 2 sont manquantes dû à un problème technique. Le différentiel de température « 0.20 à 9 m » moyen, du départ jusqu'à l'arrêt de la machine à vent, est présentée au Tableau 2.

4.2.2 Impact sur la température de l'air au couvert végétal en fonction des conditions météo moyennes

Bien qu'aucune analyse statistique n'ait été faite sur les conditions météorologiques, une analyse visuelle des graphiques (Figure 13 et Figure 14) et des températures de l'air et des conditions météorologiques moyennes (Tableau 2) atteintes lors des épisodes de déploiement de la machine permettent de mettre en évidence les conditions qui ont mené à un effet positif de la machine sur le gain de température.

4.2.2.1 Efficacité limitée, voire nulle

Dans un premier temps, la Figure 13 permet de distinguer deux épisodes où la machine n'a pas eu d'effets, soit les épisodes 3 et 4. Lors de ceux-ci, l'ensemble des températures sont semblables, car elles se situent à peu près dans la même amplitude d'écart-type. Ces deux épisodes sont également ceux dont l'efficacité potentielle de la machine en fonction du type de gel observé (gel/gelée, selon MAPAQ (2014)) était la plus limitée (Tableau 2). Ces deux épisodes étaient également ceux dont la vitesse du vent, diurnes et nocturnes, était la plus élevée. Malgré l'efficacité limitée, voire nulle du déploiement de la machine dans ces conditions, les températures de l'air ont descendues au plus bas à -1.2, et -2.6 pour les épisodes 3 et 4, respectivement.

4.2.2.2 Bonne efficacité

L'épisode 1 est le déploiement pour lequel la machine semble avoir le mieux fonctionné (Figure 13). Le rayon de 56 m apparaît clairement comme le mieux protégé, suivi des rayons à 80 m est 113 m (avec peu de distinction), suivi de la zone non protégée à 138 m. Cet épisode était celui ayant eu le plus grand différentiel de température 0.20 à 9 m (Tableau 2) et ayant aussi atteint le plus grand gain de température (+2.6°C) par rapport à la zone non protégée (138 m). Le type de gel observé, soit de la gelée blanche, représente également le type de gel où la machine aurait le plus haut potentiel d'efficacité (MAPAQ, 2014).

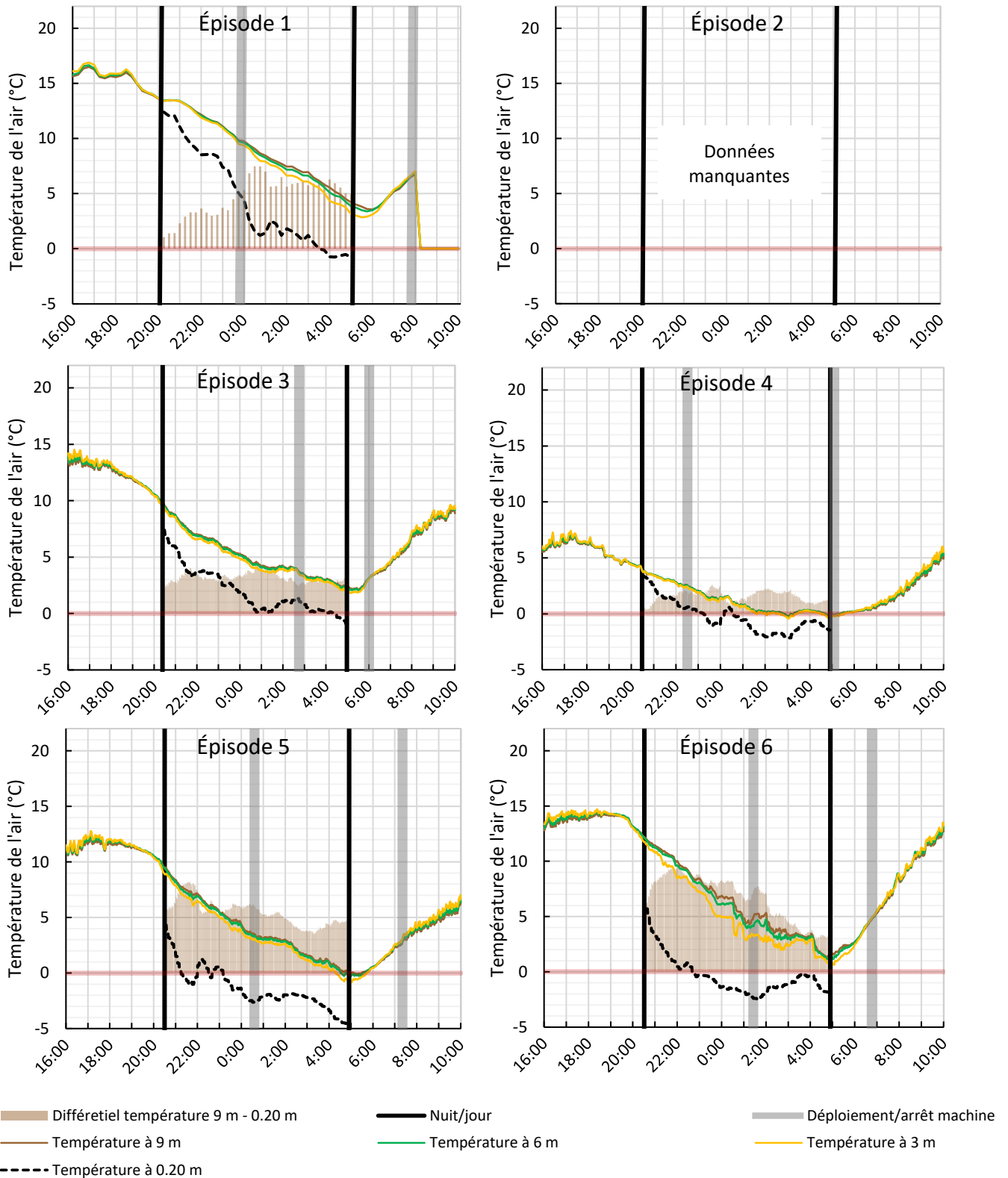


Figure 14. Température de l'air (°C) mesurée à 0.20, 3, 6 et 9 m de hauteur par rapport au sol à une distance de 56 m de la machine.

4.2.2.3 Efficacité mitigée

Les épisodes 2, 5, et 6 ont bénéficié de la protection du gel par la machine, mais de façon plus mitigée (Figure 13). L'épisode 5, était caractérisé par une gelée noire, et a atteint des minimums très froids en zone non protégée (à 138 m) de près de -6°C . Bien que les épisodes 2 et 6 étaient caractérisés par des gelées blanches (Tableau 2) avec une efficacité potentiellement élevée de la machine, l'allure des courbes présentées à la Figure 13, montre un effet faible. Le gain de température moyenne durant le déploiement est de 1.7°C et 1.0°C , respectivement pour les épisodes 2 et 6.

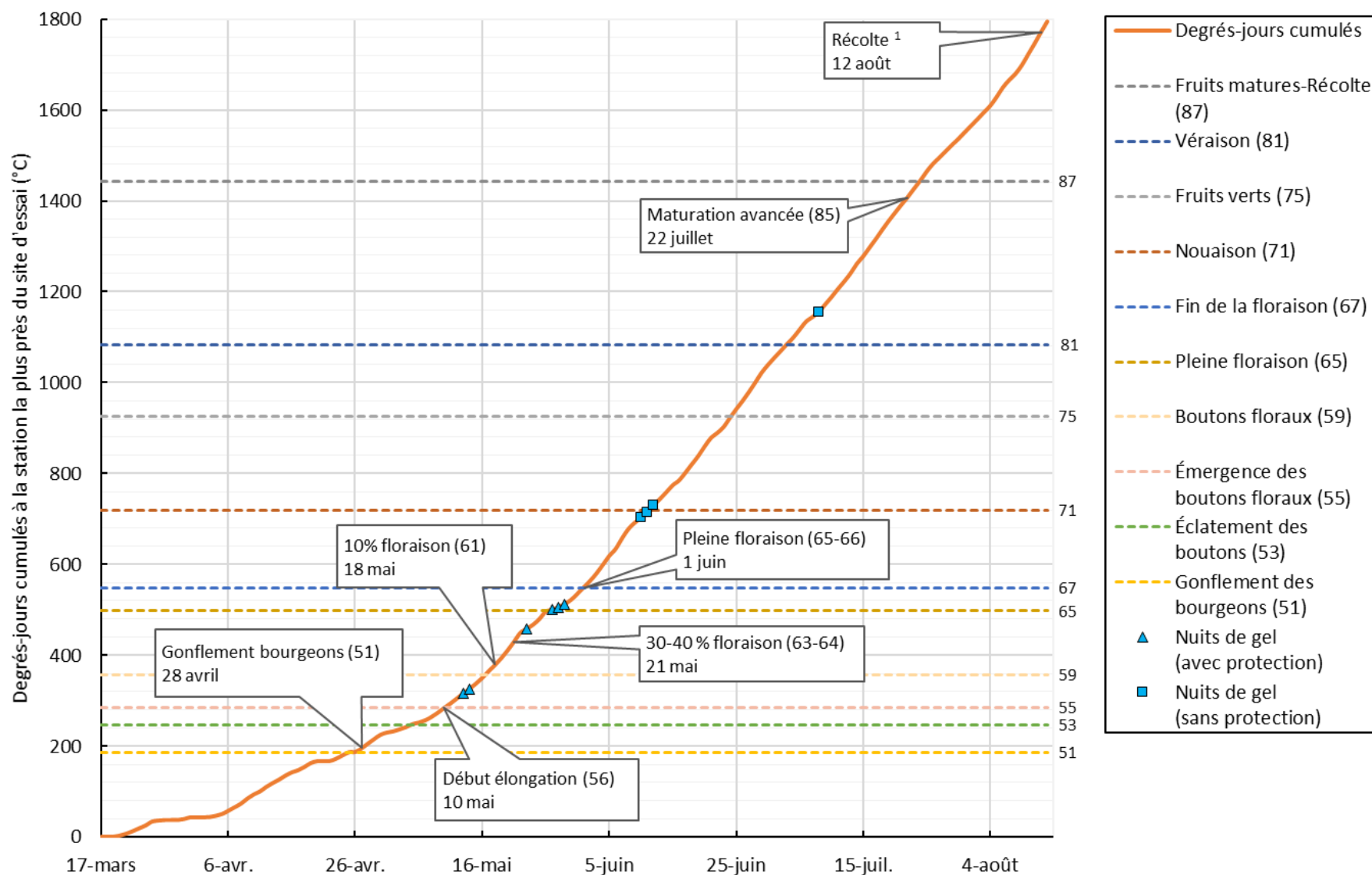
4.3 Suivi de la culture

4.3.1 Stades phénologiques

Le météogramme présenté à la Figure 15, obtenu avec l'aide de CIPRA, montre l'évolution des degrés-jours calculés. Les valeurs seuils correspondent à divers stades de développement selon l'échelle BBCH (Meier, 2001) et sont représentées par des lignes pointillées. L'observation du stade phénologique, faite à 6 reprises en saison, est représentée sur le graphique dans les bulles de texte. Les Figure 20 à Figure 22 montrent des photos des suivis du stade fait aux 10 mai, 21 mai, 1^{er} juin et 22 juillet. À noter que sur le météogramme, le 12 août correspond à la date de récolte réelle. Les fruits étaient déjà mûrs à ce moment et la date exacte de l'atteinte du stade « BBCH 87 », soit la maturité nécessaire à la récolte, n'a pas été observée. La majorité des observations sont en accord avec le modèle phénologique obtenu, mais la courbe des degrés-jours montre un stade légèrement plus avancé que ceux observés aux 10 mai et 1^{er} juin.

Les observations phénologiques du site (bulles sur la Figure 15) ont aussi été comparées aux observations du territoire de la MRC Maria-Chapdelaine publiés dans les avertissements émis par le Réseau d'avertissements phytosanitaires (MAPAQ, 2021a, et 2021b). Pour la majorité des observations, le site ne déviait pas de la norme retrouvée dans la région MRC Maria-Chapelaine et les observations faites étaient situées dans les intervalles des stades relevés. Les observations du 18 mai (BBCH 61) et du 21 mai (BBCH 64-65) montrent que le site était légèrement en avance par rapport à la MRC (comparativement à BBCH 53-59 et BBCH 59-65, respectivement). Somme toute, les observations du site sont conformes aux observations faites sur la MRC.

Comme la courbe des degrés-jours produite sur CIPRA est en accord avec les observations terrain, la modélisation des degrés-jours (Figure 15) permet de confirmer les stades phénologiques en présence aux épisodes de gels pour lesquels un déploiement de la machine a eu lieu. Les épisodes 1 et 2 ont eu lieu entre le début de l'élongation (BBCH 56) et les boutons floraux (BBCH 59). L'épisode 3 était vers 40 % floraison (BBCH 64). Finalement, les épisodes 4, 5 et 6 étaient durant la pleine floraison (BBCH 65). De plus, la période de floraison était complètement terminée lors des gelées de la mi-juin pour lesquels aucun déploiement n'a eu lieu (illustrés par des carrés bleus à la Figure 15). La gelée de la mi-juillet, quant à elle, s'est produite peu après le stade « véraison » (gelée non protégée également).



¹ Le 12 août représente la date réelle de la récolte. La date exacte de l'atteinte du stade BBCH 87 « maturité nécessaire à la récolte » est inconnue.

Figure 15. Évolution des degrés-jours calculés à partir du 17 mars selon la méthode « sinus simple » en base 0°C et avec une température optimale de 28°C (17 mars : 10 derniers cm de neiges mesurés par la station Saint-Prime). Les boîtes représentent des observations terrain faites sur les stades phénologiques.

4.3.1.1 Températures minimales atteintes et durées d'expositions des fleurs

Les fleurs ouvertes peuvent tolérer des températures de l'air allant jusqu'à -2.2°C selon Yarborough (2015). La Figure 13 permet d'apprécier visuellement les températures moyennes atteintes dans les rayons équidistants à la machine à vent, ainsi que les durées de gels. Le Tableau 2 présente les minimums moyens atteints pour chaque « distance à la machine » lors des nuits de déploiements. Les différences observées sont les suivantes :

- **Épisode 1**, les sondes les plus proches de la machine ont été plus protégées que les sondes les plus loin. C'est l'épisode qui semble avoir fonctionné le mieux. Durant cet épisode, les températures mesurées par les sondes situées à 56 m sont demeurées plus chaudes, à un minimum d'environ -1.4°C , alors que les températures à 80 et 113 et 138 m sont descendues sous -2.2°C durant environ 2 heures. Les sondes non protégées (138 m) ont mesuré le minimum le plus bas à -4.0°C , alors que les sondes à 80 et 113 m ont mesuré des températures de -2.6 et -0.9°C , respectivement.
- **Épisodes 2, 5 et 6**, les sondes à 56 m de la machine semblent avoir été protégées, alors que les sondes qui étaient situées plus loin (80 et 113 m) ne semblent pas avoir bénéficiées de cette protection (par rapport à la zone non protégée à 138 m).
- **Épisode 2**, les températures se sont toutefois maintenues plus élevées que -2.3°C pour toute les distances.
- **Épisode 5**, les valeurs mesurées par les sondes à 56 m sont descendues sous -2°C durant 1 heure au début de la nuit (00:00 à 1:00) seulement et durant 2.5 heures à la fin de la nuit (3:00 à 5:30), alors que toutes les autres sondes (à 80 m, 113 m et 138 m) sont demeurées sous -2°C sans répit durant une période de 5:30 (00:00 à 5:30) et ces dernières ont atteint un minimum de -4°C en zone non protégée (à 138 m).
- **Épisode 6**, le gain de température « 56 m » vs « 80, 113, 138 m » semble présent, mais n'est pas très marqué. La zone non protégée (à 138 m) a atteint un minimum de -3.6°C .
- **Épisodes 3 et 4**, aucun gain positif de température n'est observable, mais les températures n'étaient pas très froides, avec des minimums respectifs de -1.2 et -2.6°C , toutes distances confondues.

Les épisodes 1, 2, 5 et 6, ont obtenu un gain observable de température en fonction de la distance par rapport à la machine. Tous ces épisodes, hormis pour le 2^e, ont atteint des minimums sous -3.5°C . Or, il est documenté que des fleurs exposées à une température sous -3.5°C ne produiraient pas de fruits (Hicklenton et coll., 2002). L'épisode 1 a eu lieu au tout début de la floraison (Figure 15), alors que les épisodes 5 et 6 ont eu lieu en pleine floraison. Ces deux derniers épisodes, 5 et 6 pourraient ainsi avoir été déterminant sur les effets observés sur le rendement (rendements présentés à la section 4.3.2).

4.3.2 Modélisation du rendement

Le log (base 10) du rendement a été modélisé en fonction d'un indice de densité des ramets (1 à 9) et du poids des fruits (rapporté en kg/ha). Le résultat de la modélisation linéaire multiple sur le log du rendement est présenté au Tableau 3.

Tableau 3. Résultats de la régression linéaire multiple sur le log (base 10) du rendement en fruits.

Variable explicative	Unité de mesure	Coefficient	Erreur standard	t	Valeur p
(Constante)		3.51747	0.06447	54.564	< 0.0001
1/distance	Distance en mètre de la machine	7.15734	2.47869	2.888	0.00536
Densité	Indice (1= très bon, 9 = presque aucun plant)	-0.08335	0.01293	-6.444	< 0.0001

$F_{(2, 61)} = 25.68$; $p < 0.0001$; $R^2 = 0.4571$

Les estimations du modèle (coefficients) montrent que la « distance à la machine » et la « densité des ramets » sont des facteurs influençant le rendement de façon significative. Le coefficient de détermination (R^2) de 0.4571 indique que 46 % de la variation totale de rendement sur le site a été captée par le modèle. Obtenir un 54 % de la variance qui n'est pas expliqué par le modèle n'est pas inattendu. En effet, la variabilité du rendement sur une bleuetière peut être affectée par un éventail de facteurs plus large que ceux testés dans cette étude. La génétique de la plante peut avoir un effet. Mais aussi, tel que démontré dans Boivin et coll. (2020), les conditions environnementales en place ont aussi un effet sur le rendement tels que le pouvoir de minéralisation du sol (lui-même affecté négativement par la couche d'humus en surface) ou encore, la position géospatiale de la parcelle de récolte.

Le modèle permet d'observer que l'inverse de la distance à la machine (1/distance) était fortement corrélé au log du rendement (à $p < 0.01$) (autrement, le rendement diminuait significativement lorsque la distance à la machine augmentait). La densité était aussi très fortement négativement corrélée au rendement (à $p < 0.0001$).

Basé sur ces résultats, il est possible de mettre en relation le rendement avec l'inverse de la distance et la densité. Une représentation graphique utilisant cette relation, et les coefficients obtenus de la modélisation est illustrée à la Figure 16. Cette représentation graphique permet d'apprécier la fluctuation de rendement en fonction de la distance par rapport à la machine. Par exemple, pour une « très belle parcelle » (indice densité = 1), et pour des distances à la machine de 56, 80, 113 et 138 m (distances correspondantes aux couvertures de protection 1, 2, 4, et 6 ha, respectivement), les rendements sont de 3647, 3339, 3144, et 3062 kg/ha. Dans les conditions de l'étude, une parcelle située à 56 m de la machine a ainsi bénéficié d'un gain de rendement 19 % par rapport à une autre située à 138 m de la machine.

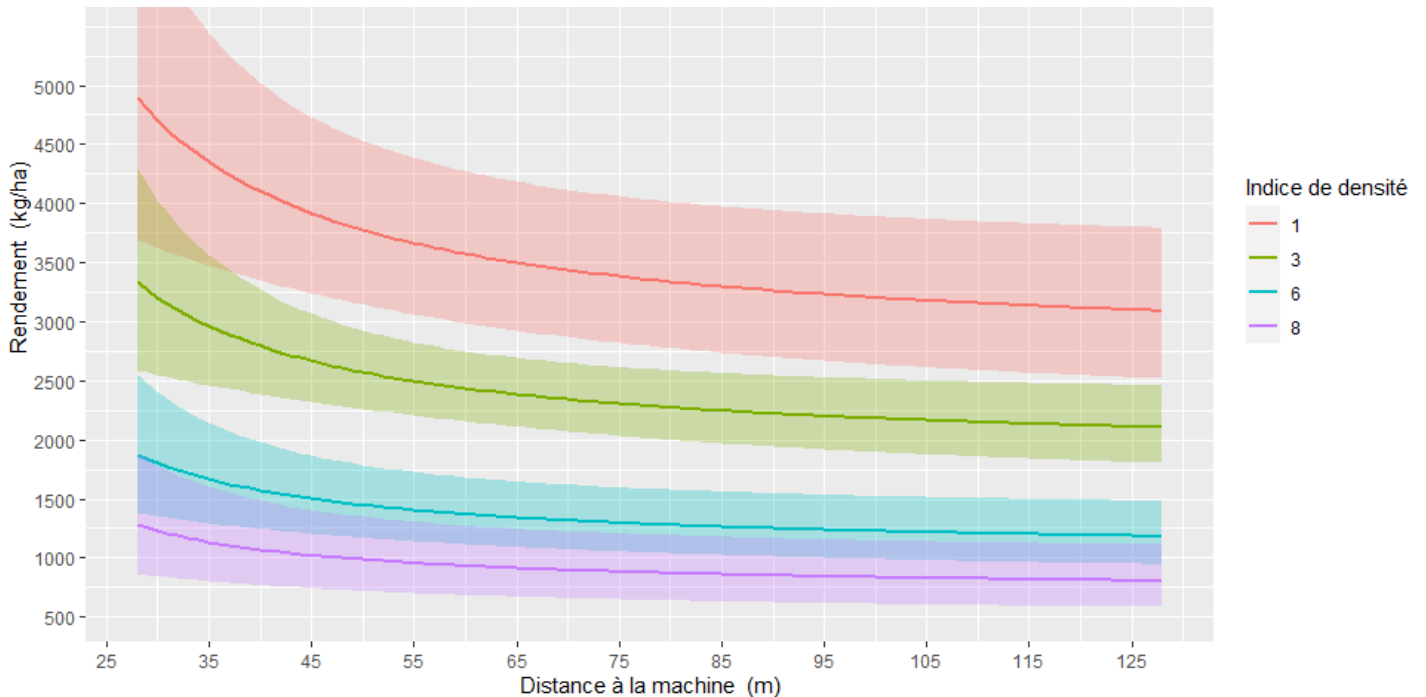


Figure 16. Rendement en fruits (kg/ha) en fonction de la distance à la machine à vent et l'indice de densité, selon le modèle linéaire multiple obtenu.

4.3.3 Modélisation du calibre des fruits

Le calibre (représenté par le poids de 100 fruits en grammes) a été modélisé en fonction de la distance à la machine et de la densité des parcelles avec un modèle linéaire. Un log (base 10) a été appliqué sur le calibre ainsi que sur la densité afin de respecter les suppositions du modèle. L'effet de la distance à la machine sur le calibre n'est pas ressorti significatif. Le modèle a pu être simplifié en enlevant l'effet de la distance comme le retrait de ce facteur n'affectait pas la performance du modèle de façon importante. Le résultat de la modélisation linéaire simple sur le calibre est présenté au Tableau 4.

Sur le site, une faible densité a négativement influencé le calibre de façon très significative ($p < 0.0001$). La Figure 17 illustre la relation obtenue à partir du modèle et de ses coefficients. Par exemple, pour une « très bonne densité » (indice densité = 1), relativement à une « très mauvaise densité » (indice densité = 8), le calibre passe de 40.4 à 31.8 g, respectivement. Par rapport aux parcelles les mieux peuplées du site, une très mauvaise densité a ainsi été associée à une baisse de 21 % du calibre des fruits.

Tableau 4. Résultats de la régression linéaire multiple sur le log (base 10) du calibre (g/100 fruits).

Variable explicative	Unité de mesure	Coefficient	Erreur standard	t	Valeur p
(Constante)		1.60604	0.01291	124.369	< 0.0001
log(densité)	Indice (1= très bon, 9 = presque aucun plant)	-0.11426	0.02543	-4.493	< 0.0001

$F_{(1, 62)} = 20.19$; $p < 0.0001$; $R^2 = 0.2456$

Or, une étude récente de Boivin et coll. (2020) a démontré qu'une densité aérienne plus faible était favorable à un poids en fruits plus élevé. Comme la relation densité-rendement observée sur le site va à l'encontre de ce qui est attendu, cela laisse supposer que les parcelles affectées par une mauvaise densité présentaient une problématique sous-jacente qui aurait empêché l'expression du plein potentiel des rendements.

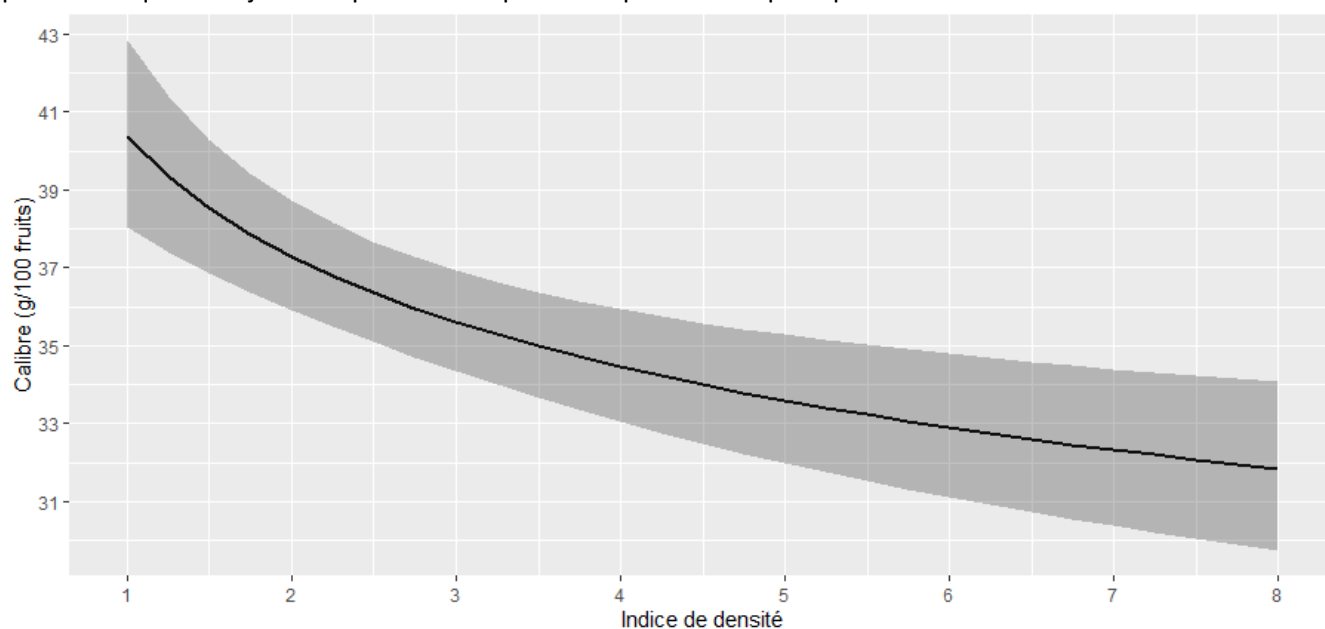


Figure 17. Calibre en fonction de l'indice de densité selon le résultat du modèle retenu selon le modèle linéaire simple obtenu.

Les modèles ont permis de représenter graphiquement les valeurs de rendement et de calibres prédites aux Figure 16 et Figure 17. Ces modèles et les prédictions qui en découlent sont représentatifs des conditions qui ont eu cours au site d'essai au printemps 2021. Bien que des fluctuations significatives (sur le calibre et sur le rendement, respectivement) aient été observées en 2021, cela ne peut se traduire à une recommandation provinciale à cette étape. Une combinaison « d'une seule année et un seul site » a été testée. Ainsi, plus d'essais sont nécessaires pour valider la performance de la machine à vent au printemps.

4.4 Problématiques rencontrées

4.4.1 Consigne de départ de la machine

Quelques problématiques se sont présentées en cours de projet. La première problématique concerne la mise en marche automatisée de la machine à vent. Ayant été initialement conçue pour la protection du gel des fruits dans les vergers, la machine à vent est équipée d'une sonde qui mesure la température de l'air à une hauteur de 1.5 m du sol. Cette sonde sert de point de mesure pour valider que la consigne de départ est atteinte. Comme la nuit, la température augmente en fonction de la hauteur, un ajustement était nécessaire. Afin d'y parvenir, la consigne de déclenchement a été ajustée à +4°C pour assurer un départ préventif lors des nuits de gel. Néanmoins, pour 50 % des épisodes de gels radiatifs, la machine s'est déclenchée à des températures à la hauteur des fruits inférieures aux seuils visés de 0°C. Pour deux épisodes marqués par une importante stratification des couches d'air (épisodes 5 et 6, Figure 7), une grande différence entre la température de démarrage visée à la hauteur des fruits (0°C) et la température réellement atteinte a été enregistrée (respectivement -4°C et -3°C). Due à cette problématique, la performance de la machine n'a donc pas été maximisée.

4.4.2 Brise-vents et portée de la machine

La seconde problématique concerne l'effet des brise-vents sur la portée de la machine et sur les sondes de températures. Pour bien fonctionner, la machine à vent doit pouvoir souffler l'air sans obstruction, vers la culture à protéger. Étant donnée la disposition des brise-vents sur la ferme, qui sont distancés de 60 et 135 m de part et d'autre des planches de terrain. Dans un monde idéal, il aurait fallu trouver un site où la hauteur des brise-vents aurait été inférieure à la hauteur de la machine. Or, ce sont principalement des brise-vents matures qui bordaient les champs en production en 2021 (environ 7-8 m de hauteur). Toujours liée à la contrainte des brise-vents, et afin de pouvoir mesurer l'effet de la machine sur la plus grande superficie possible, la machine a été installée sur la parcelle de terrain disposant de planches avec un large écartement (132 m au nord et de 126 m au sud). Néanmoins, il n'a pas été possible d'instrumenter sans contraintes aux distances de 56, 80, 113 et 138 m, sur 360° (Figure 8).

4.4.3 Brise-vents et bilan thermique

La troisième problématique concerne des éléments physiques ayant affecté le bilan thermique à certains emplacements de sondes de températures. Dans un souci de répartition spatiale uniforme (distance à la machine et nombres de degrés entre les transects de sondes), certaines sondes de températures se sont retrouvées près des brise-vents. L'effet « réchauffant des brise-vents » a été constaté après coup et les données de ces sondes ont dû être retirées des analyses. Aux nord-ouest de la machine « une zone marécageuse », a également dû être évitée, réduisant la quantité de sondes de température prévue initialement (voir Figure 8).

4.4.4 Autonomie de la machine

Finalement, un dernier élément à mentionner, mais qui n'a pas mené à de problématiques réelles durant les déploiements, est la capacité du réservoir de diésel. Le volume de ce dernier permet une autonomie de 12 h, combinée avec des déploiements par épisode d'une durée de plus de 6 h, cela impliquait de devoir refaire le plein après chaque épisode. Comme le réservoir est situé au niveau du moteur, qui est hissé à 9 m du sol lorsque la machine est en fonction, cela nécessite de descendre le bras hydraulique pour faire le plein.

5 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET CONCLUSION

5.1 Retour sur les objectifs du projet et les résultats attendus

5.1.1 La portée de l'effet de réchauffement selon les conditions d'opération

Deux types de conditions d'opérations ont été observées sur le site : des nuits radiatives et des nuits de type « gel/gelée » (MAPAQ, 2014). Durant la période de la floraison, 4 épisodes sur 6 ont été de type radiatif et les 2 autres de type « gel/gelée ». En condition de « gel/gelée », l'action de la machine à vent n'a pas permis d'obtenir de gain de température. À l'opposée, en condition de gel radiatif, des gains de températures de différentes intensités ont été observés.

5.1.2 Le gain en réchauffement de l'air au niveau des fleurs selon la distance avec la machine

Les sondes situées à 80, 113 et 138 m de la machine ont cumulé une plus grande durée d'exposition à des températures sous les -2.2°C (soit le seuil minimal de tolérance des fleurs au gel identifié par Yarborough (2015)) que les sondes situées à 56 m. Cela est vrai pour la majorité des épisodes où un gain de température a été observable graphiquement (épisodes 2, 5 et 6). Un gain positif et distinctif par rapport à 138 m, a été observé aux trois distances théoriquement protégées (56, 80 et 113 m), lors d'un seul des 6 épisodes (soit le premier). Globalement, la distance de 56 m (couverture de 1 ha) est celle qui a bénéficié de la meilleure protection sur la base des observations de températures.

Néanmoins, des températures minimales moyennes sous -3.5°C ont été enregistrées à au moins une reprise à toutes les distances. La valeur de -3.5°C représente un seuil critique d'exposition à la suite duquel une fleur ne produirait plus de fruit (Hicklenton et coll., 2002). Par conséquent, la machine n'a pas permis une protection à 100 % contre le gel, peu importe le rayon d'action.

Toutefois, pour tous les épisodes où des moyennes sous -3.5°C ont été enregistrées à 56 m, la machine s'est déclenchée trop tard. Un meilleur positionnement de la sonde de température pour la consigne de déclenchement de la machine pourrait permettre un déclenchement de la machine au bon moment, et ainsi, mieux protéger les fleurs du gel. En raison de cette problématique technique liée à l'équipement, il est possible que le plein potentiel de protection contre le gel (et conséquemment le plein potentiel de rendement) n'ait pas pu s'exprimer.

5.1.3 Diminution du dégât de gel aux fleurs

Le dégât qu'a pu occasionner le gel aux fleurs n'a pas été mesuré directement. Des mesures de rendements, prises en fonction de la distance par rapport à la machine ont permis d'évaluer la portée de la protection des fleurs par la machine à vent.

Le rendement modélisé (modèle linéaire, R^2 à 46 %) a permis de démontrer que le rendement diminuait significativement en fonction de l'éloignement de la machine et en fonction de la diminution de la densité des plants. Cette analyse a permis de confirmer que, malgré un délai de déclenchement et des températures à -3.5°C atteintes à toutes les distances pour au moins un épisode, la machine a eu un effet positif sur la protection des fleurs contre le gel (qui s'exprime par des rendements plus élevés en zone protégée). De son côté, le calibre (poids de 100 fruits) n'a pas été affecté négativement par la distance à la machine. Par contre, celui-ci a été affecté négativement par une densité des plants plus faibles.

Le fait que 54 % de la variance a échappé au modèle du rendement en fonction de la distance et de la densité, auquel s'ajoute le fait que des densités plus faibles ont affecté négativement les rendements et le calibre, cela permet de poser l'hypothèse suivante que d'autres facteurs que le gel ont eu une influence négative sur le rendement.

5.2 Conclusion

Finalement, bien que la machine n'ait pas été efficace à 100 % pour protéger les fleurs du gel, son utilisation a eu un effet positif qui s'est traduit par une augmentation des rendements en zone protégée. La sonde de température utilisée par la machine pour la mise en marche de celle-ci devrait être abaissée à la hauteur des fruits pour s'assurer que la consigne de déclenchement souhaitée soit respectée. Des essais devraient être faits pour vérifier l'efficacité de la machine sans cette problématique technique.

Il a aussi été noté que d'autres facteurs que ceux mesurés dans le cadre de l'étude ont affecté négativement les rendements. L'effet de ces facteurs devrait être étudié pour identifier le ou les facteurs les plus limitants à l'expression des rendements.

L'année 2021 était particulière, avec un synchronisme « fleur-gel » hors-norme. L'acquisition d'une machine à vent devrait être précédée d'une analyse économique prenant en compte les gains potentiels de rendement associés à son déploiement au printemps et/ou à l'automne (marché frais), mais aussi la probabilité des récurrences climatiques favorisant le synchronisme « fleur-gel » ou le gel des fruits à l'automne, en plus des risques associés à son utilisation, soit l'efficacité accrue où limitée en fonction des conditions climatiques. Plus d'essais devraient être faits pour mieux documenter l'efficacité de la machine avec les divers types de gels et conditions climatiques pouvant être rencontrées.

6 ANNEXE



Figure 18. Capteur MX2201 (Onset) installé à la hauteur des fleurs pour le suivi de la température de l'air, photo prise à la suite des périodes de gels, 10 juin 2021. (Diamètre de la sonde : 18 mm).



Figure 19. Machine à vent, 13 mai 2021.



Figure 20. Suivi du stade de la culture, 10 mai 2021.



Figure 21. Suivi du stade de la culture, 21 mai 2021.



Figure 22. Suivi du stade de la culture, 1^{er} juin 2021.



Figure 23. Suivi du stade de la culture, 22 juillet 2021.

Tableau 5. Degré d'efficacité des méthodes de lutte au gel printanier selon le type de gel tel que présenté par MAPAQ (2014).

Méthodes	Gelée blanche	Gelée noire	Gel/gelée
Machines à vent	***	**	*
Machines à vent et brûleurs	—	**	*
Irrigation par aspersion	***	***	***
Hélicoptère	***	**	—
Brûleurs, bûches	***	**	**
Bonne sélection du site	***	**	*

*** : très efficace ** : efficace * : efficacité limitée — : inefficace ou non applicable

Notez bien que le gel par advection n'apparaît pas dans ce tableau, puisqu'il n'existe aucune méthode de protection efficace contre ce type de gel mis à part la couverture complète des cultures par le buttage ou les toiles géotextiles.

7 BIBLIOGRAPHIE

Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC). 2021. Centre Informatique de Prédiction des Ravageurs en Agriculture. [En ligne] <https://agriculture.canada.ca/fr/sciences-agricoles-innovation/resultats-recherches-agriculture/centre-informatique-prevision-ravageurs-agriculture-cipra>, page consultée le 15 mars 2021.

Agrinova. 2015. Mise à l'essai et optimisation de l'utilisation d'éoliennes mobiles comme moyen de lutte contre le gel printanier dans la production de bleuets sauvages au Saguenay-Lac-Saint-Jean. [En ligne] <https://agrinova.qc.ca/projets/mise-a-lessai-et-optimisation-de-lutilisation-deoliennes-mobiles-comme-moyen-de-lutte-contre-le-gel-printanier-dans-la-production-de-bleuets-sauvages-au-saguenay-lac-saint-j/>, page consultée le 1^{er} avril 2022.

Barclay, P. E. 2008. Spring Cold Injury to Winegrapes and Protection Strategies and Methods. Hortscience. Volume 43, numéro 6, p. 1658.

Bellemare M., Barriault É., Deslauriers A., Martel P.-O. et Moreau V. 2017. La production du bleuets sauvage dans une perspective de développement durable. Feuillet 3.3 « Le gel printanier et automnal ». 13 p.

Boivin C., G. Bourgeois, J. Vallée, P. Deschênes, L. Belzile, P.-O. Martel et D. Bergeron. 2019. Régie raisonnée de l'eau pour le bleuets nain cultivé dans un contexte de climat variable et en évolution.

Boivin C., J. Vallée, A. Lamontagne et P.-O. Martel. 2020. Est-ce possible d'expliquer la variabilité du rendement à l'intérieur d'une bleuetièrre? 41 p.

Dai A., K. E. Trenberth, T. R. Karl. 1999. Effects of Clouds, Soil Moisture, Precipitation, and Water Vapor on Diurnal Temperature Range. Journal of Climate, 12 (8), 2451–2473

Environnement Canada, 2022a. [En ligne] https://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_f.html?searchType=stnName&txtStationName=normandin&searchMethod=contains&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=5926&dispBack=1, page consultée le 31 mars 2022.

Environnement Canada, 2022b. [En ligne] https://climat.meteo.gc.ca/climate_data/hourly_data_f.html?hlyRange=1994-02-01%7C2022-03-13&dlyRange=1993-08-31%7C2022-03-13&mlyRange=%7C&StationID=10872&Prov=QC&urlExtension=f.html&searchType=stnName&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2022&selRowPerPage=25&Line=0&searchMethod=contains&txtStationName=normandin&timeframe=1&time=LST&time=LST&Year=2021&Month=3&Day=13#, page consultée le 31 mars 2022.

Financière agricole du Québec (FADQ). 2022. [En ligne] <https://www.fadq.qc.ca/salle-de-presse/bulletins-dinformation/etat-des-cultures/2022/etat-des-cultures-au-quebec-en-2021/#avis-dommages-indemnite-assurance-recolte>, page consultée le 24 mars 2022.

Hersbach H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, ... & J. N. Thépaut. 2020. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146 (730), 1999-2049.

Hicklenton, P.R., J.Y.C. Reekie, K. MacKenzie, D. Ryan, L.J. Eaton et P. Havard. 2002. Freeze damage and frost tolerance thresholds for flowers of the lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait). Acta Hort. 574:193-201.

Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Pêcheries du Québec (MAPAQ). 2014. Gel printanier et méthodes de protections. Bleuets nains. Page consultée le 15 mars 2022. [En ligne] <https://www.agrireseau.net/Rap/documents/b01bn14.pdf>, page consultée le 31 mars 2022.

MAPAQ. 2021a. Gel printanier et méthodes de protections. Bleuets nains, Avertissement No 3 – 18 mai 2021. [En ligne] <https://www.agrireseau.net/rap/documents/105601/bleuet-nain-avertissement-no-3-18-mai-2021?s=3452&page=2&a=1>, page consultée le 8 avril 2022.

MAPAQ. 2021b. Gel printanier et méthodes de protections. Bleuets nains, Avertissement No 4 – 26 mai 2021. [En ligne] <https://www.agrireseau.net/rap/documents/105661/bleuet-nain-avertissement-no-4-26-mai-2021?s=3452&page=2&a=1>, page consultée le 8 avril 2022.

MAPAQ. 2014. Gel printanier et méthodes de protections. Bulletin d'information No 01 – 2 avril 2014. [En ligne] <https://www.agrireseau.net/Rap/documents/b01bn14.pdf>, page consultée le 24 mars 2022.

MAPAQ. 2022. Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie du bleuets sauvage au Québec. 28p. [En ligne] <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographiebleuet.pdf>, page consultée le 31 mars 2022.

Martel, P.O. 2022. Retour sur la saison 2021 et actualités. Webinaire Bleuets Saguenay–Lac-Saint-Jean. 16 mars 2022.

Meier, U. 2001. Stades phénologiques des mono- et dicotylédones cultivées. Stades phénologiques du groseillier. Centre Fédéral de Recherches Biologiques pour l'Agriculture et les Forêts. 204 p.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). 2022a. [En ligne] <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/2021/mars.htm>, page consultée le 24 mars 2022.

MELCC. 2022b. [En ligne] <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/2021/aout.htm#sec>, page consultée le 24 mars 2022.

Tow and Blow, 2021. Communication personnelle, 25 novembre 2021.

Viúdez-Mora, A., M. Costa-Surós, J. Calbó et J. A. González. 2015. Modeling atmospheric longwave radiation at the surface during overcast skies: The role of cloud base height. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(1), 199-214.

Yarborough, D. 2015. Flower primordia development stage. Fact Sheet no. 216. University of Maine. Extension no. 2003. [En ligne] <https://extension.umaine.edu/blueberries/factsheets/irrigation/flower-primordia-development-stage/>, page consultée le 24 mars 2022.