

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

Lélia Anderson, Carl Boivin et Jérémie Vallée

Rapport final

PDS203022

Projet pilote sur l'efficacité de méthodes de protection contre le gel des fruits dans le bleuet sauvage cultivé

Décembre 2023

Table des matières

1	Rappel du projet initial	1
1.1	Contexte	1
1.2	Objectifs.....	1
1.3	Équipe de projet	2
1.4	Durée du projet	2
1.5	Point de contact pour information.....	2
2	Faits saillants.....	3
3	Déroulement du projet.....	4
3.1	Résumé des réalisations	4
3.2	Réalisations.....	5
3.2.1	Choix des sites où ont été évaluées les méthodes de protection contre le gel	5
3.2.2	Instrumentation des sites et paramètres mesurés	6
3.2.2.1	Conditions météorologiques	6
3.2.2.2	Point de rosée.....	7
3.2.2.3	Suivi de la température de l'air dans le système cultural.....	7
3.2.2.3.1	Tous les sites	7
3.2.2.3.2	Températures de l'air et du sol aux sites « irrigation sol sec » et « bâche ».....	7
3.2.2.4	Stratification thermique de l'air	8
3.2.2.5	Teneur en eau volumique du sol	8
3.2.2.6	Fermeté des fruits.....	9
3.2.3	Implanter des méthodes de protection contre le gel.....	10
3.2.3.1	Méthodes actives.....	10
	Machine à vent.....	10
	Bâche.....	11
	Irrigation.....	12
3.2.3.2	Méthodes passives	12
	Irrigation du sol sec	12
	Brise-vent	13
3.2.4	Opérer des méthodes de protection	14
3.2.4.1	Que dit la littérature?	14
	La résistance au gel automnal du bleuet.....	14
3.2.4.1.1	Types de gels	15
	Gel radiatif.....	16
	Gel advectif.....	16
3.2.4.1.2	Identifier les risques de gel sur la bleuetière	16
	Pente	17
	Topographie	17
	Aménagement de la bleuetière	17
	Étendue d'eau	17
	Vents.....	18
	Stations météo utilisées pour l'évaluation des risques de gel	18
3.2.4.1.3	Conditions gagnantes	18
	Machine à vent.....	18
	Haie brise-vent	20
	Irrigation.....	23
	Irrigation du sol sec	23
	Bâche.....	25

3.2.4.2	Consignes de déclenchement	26
	Machine à vent	26
	Bâche	26
	Brise-vent	27
	Irrigation	27
	Irrigation du sol sec	27
3.2.5	Identifier et caractériser les risques avec l'approche SWOT modifiée	27
3.2.6	Déterminer les coûts pour l'adoption, selon la méthode	27
3.2.7	Améliorer la compréhension des conditions météorologiques qui représentent un risque de gel	27
3.2.7.1	Réurrences climatiques des gels au Saguenay–Lac-Saint-Jean	27
3.2.7.1.1	Définition du domaine d'analyse	27
3.2.7.1.2	ERA5	29
3.2.7.1.3	Stations météorologiques	29
3.2.7.1.4	Analyse agrométéorologique	30
3.2.7.2	Cartes d'interpolations spatiales	30
3.2.7.3	Analyses statistiques de la température au niveau des fruits	31
	Déploiement ponctuel	31
	Déploiement en continu	32
3.2.7.4	Analyses statistiques de la fermeté des fruits	32
3.2.7.5	Relation entre la fermeté et les degrés-heure de gel	32
3.2.7.6	Outils visuels et conditions moyennes	33
	Couvert nuageux	33
3.3	Activités de diffusion	34
4	Atteintes des objectifs	35
4.1.1	Mettre à l'essai des méthodes passives et actives de protection des fruits contre le gel qui sont adaptées au contexte de production du bleuet sauvage cultivé.	35
4.1.1.1	Dates des déploiements : réussites et échecs	35
4.1.1.2	Suivi des conditions moyennes atteintes	37
4.1.2	Identifier et détailler les risques économiques, agronomiques et environnementaux conséquents à l'adoption de chacune des méthodes à l'étude.	37
4.1.3	Déterminer les coûts pour l'adoption, selon la méthode	40
4.1.4	Quantifier l'impact de l'adoption de cette pratique sur la diminution du risque de gel précoce lors de la période de récolte souhaitée.	41
4.1.5	Améliorer la compréhension des conditions météorologiques qui favorisent un risque élevé de gel.	43
4.1.5.1	Tableaux récapitulatifs	43
	Machine à vent	43
	Brise-vent	46
	Irrigation sol sec	47
	Bâche	48
	Irrigation	51
4.1.5.2	Analyses statistiques	52
4.1.5.2.1	Analyse statistique de la température au niveau des fruits	52
	Bâche 19 g/m ²	52
	Bâche 38 g/cm ²	53
	Irrigation	53
	Brise-vent	54
	Irrigation du sol sec	56
	Machine à vent	56
4.1.5.2.2	Analyse statistique sur la fermeté	58
	Machine à vent	58
	Bâche 38 g/cm ²	59
	Brise-vent	60
	Sol sec	61
	Irrigation	61
4.1.5.2.3	Relation entre la fermeté et les degrés-heure de gel (DH)	63

4.1.5.2.4	Prédiction de fermeté pour 2020-2022.....	64
4.1.5.3	Cartes d'interpolation spatiales.....	65
Machine à vent.....	65	
Bâche.....	66	
Brise-vent.....	68	
Irrigation du sol sec.....	69	
Irrigation.....	70	
Commentaires généraux.....	71	
4.1.5.4	Réurrences climatiques des gels au Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	72
Dates moyennes de premiers gels.....	73	
Nombre de gels cumulatifs durant le mois de septembre.....	74	
Validité des nombres de gels modélisés.....	77	
Épisodes de gel par année (2020 à 2021).....	78	
5	Retombées pour le secteur.....	82
6	Suivi des indicateurs de résultats.....	82
Démonstration du niveau d'efficacité des méthodes de protection contre le gel comparativement à l'absence de protection.....	82	
Nombre de participants aux événements de démonstration des différentes méthodes de protection contre le gel.....	82	
Nombre d'entreprises démontrant de l'intérêt pour l'adoption de l'une des méthodes de protection contre le gel présenté.....	82	
Prolonger la récolte jusqu'au 1 ^{er} octobre.....	83	
7	Conclusion.....	84
8	Références.....	86
Annexe 1.	Plans des sites d'essai.....	89
Annexe 2.	Matériel complémentaire à la section 3.2.7.....	106
Annexe 3.	Graphiques des conditions météo.....	107
Annexe 4.	Profil vertical des températures.....	123
Machine à vent.....	123	
Annexe 5.	Graphiques des températures à la hauteur des fruits.....	132
Machine à vent.....	132	
Bâche.....	142	
Brise-vent.....	152	
Irrigation.....	164	
Irrigation du sol sec.....	171	
Annexe 6.	Visualisation de l'accumulation des degrés-heures gel sous DH-2°C.....	179
Annexe 7.	Photos.....	183
Annexe 8.	Cartes thermiques.....	195
Machine à vent.....	195	
Bâche.....	210	
Brise-vent.....	225	
Irrigation du sol sec.....	240	
Irrigation durant le gel.....	254	
Annexe 9.	Déterminer les coûts d'adoption, d'utilisation et d'entretien spécifiques à chaque méthode.....	269

Liste des figures

Figure 1. Emplacement des sites où les méthodes de protection contre le gel ont été mises à l'essai et les secteurs couverts par les stations météorologiques (A, B et C).	5
Figure 2. Stations météo a) Campbell Scientific et b) Climavue50.....	6
Figure 3. Tour utilisée pour le suivi de la stratification thermique de l'air au site « machine à vent ».	8
Figure 4. Pénétrromètre à fruit (FT-02, QA supplies) utilisé pour les tests de fermeté : a) vue d'ensemble lors de test, b) cadran, c) embout de 3 mm, d) tige portant une grappe avec bleuets d'allures vendables et d'allures non vendables (ratatinés), 15 septembre 2022.....	9
Figure 5. Machine à vent a) vue de face et positionnement de la sonde de température sous le boîtier de contrôle (flèche rouge), b) vue d'arrière et c) vue lors de la montée/descente avec le bras hydraulique.	10
Figure 6. Aux sites « irrigation » : a) gicleurs b) vue d'ensemble du système d'irrigation et c) pompe actionnée par la prise de force du tracteur.....	12
Figure 7. Clé diagnostique des risques de gels en fonction des conditions, figure adaptée de Poling (2008) et de MAPAQ (2014).....	15
Figure 8. Schéma simplifié de la stratification thermique de l'air en fonction du moment de la journée pour a) le jour et b) les nuits où il y a présence d'inversion des températures.	18
Figure 9. Schémas illustrant les effets des brise-vent à l'échelle parcellaire sur les échanges radiatifs. Rayonnement a) de grande longueur d'onde (rayonnement des haies et rayonnement atmosphérique) et b) de courte longueur d'onde (rayonnement solaire direct soit ombre et réflexion). Figure adaptée de Guyot (1997).	20
Figure 10. Schématisation de la variabilité spatiale des températures nocturnes en condition radiative, pour des haies perméables ou imperméables. Figure adaptée de Quénot et Beltrando (2007).	20
Figure 11. Schématisation de la variabilité spatiale des températures nocturnes en condition radiative en terrain incliné pour (en haut) des haies imperméables et (en bas) des haies perméables. Figure adaptée de Quénot et Beltrando (2007).	21
Figure 12. Schématisation de la variabilité spatiale des températures nocturnes en condition advective pour (en haut) des haies imperméables et (en bas) des haies perméables. Figure adaptée de Quénot et Beltrando (2007).....	22
Figure 13. Schéma simplifié du principe physique lors de la formation de la glace, pour la méthode de protection de l'irrigation durant le gel.	23
Figure 14. Schéma simplifié des échanges de chaleur durant le gel, pour la méthode de protection de l'irrigation avant le gel (irrigation du sol sec).....	24
Figure 15. Schéma simplifié des échanges de chaleur pour la méthode de protection de la bâche.	25
Figure 16. Périmètre utilisé pour les analyses agrométéorologiques (Google Maps). Les points représentent les stations météorologiques publiques ayant des données météorologiques 1992-2022.....	28
Figure 17. Distribution des bleuetières au S.-L.-St-J. (MAPAQ, 2023).....	28
Figure 18. Durée de protection, 2020 à 2023, en considérant un déploiement hypothétiquement « parfait » des méthodes de protection (c'est-à-dire sans bris mécanique).	42
Figure 19. Gain de température (°C) dans la zone protégée par la machine à 56 m en fonction de l'inversion de température (9 m - 0,2 m) sur les données de la tour témoin 2022 située à 400 m de la machine.....	45
Figure 20. Gain de température à 56 m (°C) en fonction de la vitesse du vent (km/h).	45

Figure 21. Retard de la sénescence des feuilles visibles sous la bâche, a) vue horizontale le 15 septembre 2022, et b) vue aérienne le 20 septembre 2022.....	50
Figure 22. Au site « bâche 19 g/m ² » 2020, effet de la bâche sur a) la température moyenne nocturne, b) la température minimale nocturne et les DH _{-2°C} cumulatifs. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	52
Figure 23. Au site « bâche 38 g/m ² » 2022, effet de la bâche sur a) la température moyenne nocturne, b) la température minimale nocturne et c) les DH _{-2°C} cumulatifs. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	53
Figure 24. Aux sites « irrigation » pour toutes les périodes protégées, effet modélisé de l'irrigation sur a) la température moyenne (nuit), b) la température minimale (nuit) et c) les DH _{-2°C} pour une nuit. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	54
Figure 25. Au site « brise-vent » 2022, effet de la date sur a) les températures moyennes, b) les températures minimales, et c) les DH _{-2°C} cumulatifs, modélisés pour trois distances au brise-vent. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	55
Figure 26. Au site « brise-vent » 2022, effet du brise-vent sur a) la température moyenne (nuit), et b) la température minimale (nuit) et c) les DH _{-2°C} cumulatifs, tous modélisés pour trois dates sélectionnées. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	55
Figure 27. Au site « irrigation sol sec » 2022, effet du sol plus humide modélisé sur a) la température moyenne (nuit), b) la température minimale (nuit), et c) les DH _{-2°C} cumulatifs, modélisés. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	56
Figure 28. Aux sites « machine à vent », effet de la machine modélisé sur a) la température moyenne (nuit), b) la température minimale (nuit) pour trois dates sélectionnées, ainsi que c) sur l'accumulation des DH _{-2°C} (résultat pour toutes les périodes protégées 2020 et 2021). Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	57
Figure 29. Au site « machine à vent » 2022, fermeté du bleuet (g/3 mm) en fonction de la distance à la machine et du jour de l'année, selon le résultat du modèle additif généralisé. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	58
Figure 30. Au site « bâche 38 g /m ² » 2022, fermeté du bleuet (g/3 mm) selon le traitement (protégé ou non-protégé) en fonction du jour de l'année, selon le résultat du modèle additif généralisé. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	59
Figure 31. Au site « brise-vent » 2022, fermeté du bleuet (g/3 mm) en fonction de la distance au brise-vent et du jour de l'année, selon le résultat du modèle additif généralisé. Résultats représentés a) à toutes les distances et b) à 2 m, 15,3 m et 43 m (centre du brise-vent). Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	60
Figure 32. Au site « irrigation du sol sec » 2022, fermeté du bleuet (g/3 mm) selon le traitement (protégé ou non-protégé) en fonction du jour de l'année, selon le résultat du modèle additif généralisé. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	61
Figure 33. Au site « irrigation » 2022, fermeté du bleuet (g/3 mm) selon le traitement (protégé ou non-protégé) en fonction du jour de l'année, selon le résultat du modèle additif généralisé. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	61
Figure 34. Avec les données des sites « brise-vent », relation entre la fermeté du bleuet (g/3 mm) et les DH _{-2°C} . La bande grise montre les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	63

Figure 35. Fermeté prédite en fonction des $DH_{-2^{\circ}C}$, et représentée en fonction (en haut) de la date pour les trois années du projet, et (en bas) de la température moyenne horaire sur la ferme (non-protégé). Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.....	64
Figure 36. Au site « machine à vent » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	65
Figure 37. Au site « machine à vent » le 20 septembre 2022 à 4:00, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits (toutes les heures de cette date sont disponibles en annexe).....	65
Figure 38. Aux sites « bêche 19 g/m ² » et « bêche 38 g/m ² » la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.	66
Figure 39. Aux sites « bêche 19 g/m ² » et « bêche 38 g/m ² », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	67
Figure 40. Au site « brise-vent » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits (autres dates pour bêche disponibles en annexe).	68
Figure 41. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	69
Figure 42. Au site « irrigation » la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.	70
Figure 43. Aux sites 2020 « irrigation du sol sec » et « irrigation », courbes de niveau (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.....	71
Figure 44. Date moyenne du premier gel automnal (seuil 0 °C) selon a) l'Atlas agroclimatique (gel à 2 m, Agrométéo Québec, 2022) b) et selon la réanalyse d'ERA5 (gel selon la température de surface <i>skin temperature</i>). Les premiers gels arrivent dans les zones bleutées.	72
Figure 45. Dates moyennes de premier gel selon la réanalyse d'ERA5 pour la période 1992 - 2022, et selon les types de gel.	73
Figure 46. Dates moyennes des premiers gels de type faible pour la période 1992 - 2022 selon la réanalyse d'ERA5. .74	
Figure 47. Dates moyennes des premiers gels de type blanc pour la période 1992 - 2022 selon la réanalyse d'ERA5. .75	
Figure 48. Dates moyennes des premiers gels de type noir pour la période 1992 - 2022 selon la réanalyse d'ERA5.....75	
Figure 49. Dates moyennes des premiers gels de type mixte pour la période 1992 - 2022 selon la réanalyse d'ERA5. .76	
Figure 50. Dates moyennes des premiers gels de type advectif pour la période 1992 - 2022 selon la réanalyse d'ERA5.	76
Figure 51. Dates des premiers gels prédits pour 2020 (réanalyse d'ERA5). La dernière couleur (10-31+) contient toutes les dates de premiers gels du mois de novembre.	78
Figure 52. Dates de premiers gels prédits pour 2021 (réanalyse d'ERA5). La dernière couleur (10-31+) contient toutes les dates de premiers gels du mois de novembre. Les premiers gels ayant eu lieu après le 30 novembre sont en blanc.	79
Figure 53. Dates de premiers gels prédits pour 2022 (réanalyse d'ERA5). La dernière couleur (10-31+) contient toutes les dates de premiers gels du mois de novembre. Les premiers gels ayant eu lieu après le 30 novembre sont en blanc.	80
Figure 54. Schéma des installations du site « Machine à vent », automne 2020.	90
Figure 55. Schéma des installations du site « Machine à vent », automne 2021.	91
Figure 56. Schéma des installations du site « Machine à vent », automne 2022.	92

Figure 57. Schéma des installations du site « Machine à vent », printemps 2022.	93
Figure 58. Schéma des installations du site « Bâche », 2020.	94
Figure 59. Schéma des installations du site « Bâches », 2021.....	95
Figure 60. Schéma des installations du site « Bâches », 2022.....	96
Figure 61. Schéma des installations du site « Irrigation », 2020.....	97
Figure 62. Schéma des installations du site « Irrigation », 2021.....	98
Figure 63. Schéma des installations du site « Irrigation », 2022.....	99
Figure 64. Schéma des installations du site « Brise-vent », 2020.	100
Figure 65. Schéma des installations du site « Brise-vent », 2021.	101
Figure 66. Schéma des installations du site « Brise-vent », 2022.	102
Figure 67. Schéma des installations du site « Irrigation sol sec », 2020.	103
Figure 68. Schéma des installations du site « Irrigation du sol sec », 2021.	104
Figure 69. Schéma des installations du site « Irrigation du sol sec », 2022.	105
Figure 70. Conditions météorologiques enregistrées à la station météo C lors des épisodes de gel de l'automne 2020 (1/2). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).....	108
Figure 71. Conditions météorologiques enregistrées à la station météo C lors des épisodes de gel de l'automne 2020 (2/2). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).....	109
Figure 72. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et B lors des épisodes de gel de l'automne 2021 (1/4). Vitesse du vent à 3,3 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m et à 20 cm (°C).	110
Figure 73. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et B lors des épisodes de gel de l'automne 2021 (2/4). Vitesse du vent à 3,3 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m et à 20 cm (°C).	111
Figure 74. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et B lors des épisodes de gel de l'automne 2021 (3/4). Vitesse du vent à 3,3 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m et à 20 cm (°C).	112
Figure 75. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et B lors des épisodes de gel de l'automne 2021 (4/4). Vitesse du vent à 3,3 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m et à 20 cm (°C).	113
Figure 76. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (1/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).	114
Figure 77. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (2/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).	115
Figure 78. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (3/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).	116
Figure 79. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (4/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).	117
Figure 80. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (5/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).	118
Figure 81. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (6/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).	119
Figure 82. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (7/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).	120

Figure 83. Conditions météorologiques enregistrées à la station météo A lors des épisodes de gel du printemps 2022 (1/2). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).....121

Figure 84. Conditions météorologiques enregistrées à la station météo A lors des épisodes de gel du printemps 2022 (2/2). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).....122

Figure 85. Au site « machine à vent » 2020, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine.....123

Figure 86. Au site « machine à vent » 2020, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine.....124

Figure 87. Au site « machine à vent » 2020, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine.....125

Figure 88. Au site « machine à vent » 2021, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2, 3, 6 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine.126

Figure 89. Au site « machine à vent » 2022, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 et 400 m (hors protection) de la machine.127

Figure 90. Au site « machine à vent » 2022, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 et 400 m (hors protection) de la machine.128

Figure 91. Au site « machine à vent » 2022, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 et 400 m (hors protection) de la machine.129

Figure 92. Au site « machine à vent » 2022 au printemps, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine.130

Figure 93. Au site « machine à vent » 2022 au printemps, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine131

Figure 94. Au site « machine à vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.133

Figure 95. Au site « machine à vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.134

Figure 96. Au site « machine à vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.135

Figure 97. Au site « machine à vent » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.136

Figure 98. Au site « machine à vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits et à la sonde de température de la machine à 1,5 m (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.....137

Figure 99. Au site « machine à vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits et à la sonde de température de la machine à 1,5 m (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.....138

Figure 100. Au site « machine à vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes. Les données sont présentées pour cet épisode même si la machine s'est déployée automatiquement, et qu'il y a eu un bris à heure indéterminée.....139

Figure 101. Au site « machine à vent » 2022 au printemps, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits et à la sonde de température de la machine à 1,5 m (°C).....140

Figure 102. Au site « machine à vent » 2022 au printemps, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C).141

Figure 103. Au site « bâche 19 g/m² » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.143

Figure 104. Au site « bâche 19 g/m² » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.144

Figure 105. Aux sites « bâche 19 g/m² et « bâche 38 g/m² » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.145

Figure 106. Aux sites « bâche 19 g/m² et « bâche 38 g/m² » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.146

Figure 107. Au site « bâche 38 g/m² » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.147

Figure 108. Au site « bâche 38 g/m² » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.148

Figure 109. Au site « bâche 38 g/m² » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.149

Figure 110. Au site « bâche 38 g/m² » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.150

Figure 111. Au site « bâche 38 g/m² » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.151

Figure 112. Au site « brise-vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.....153

Figure 113. Au site « brise-vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.....154

Figure 114. Au site « brise-vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.....155

Figure 115. Au site « brise-vent » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.....156

Figure 116. Au site « brise-vent » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.....157

Figure 117. Au site « brise-vent » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.....158

Figure 118. Au site « brise-vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent.159

Figure 119. Au site « brise-vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent.160

Figure 120. Au site « brise-vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent.161

Figure 121. Au site « brise-vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent.162

Figure 122. Au site « brise-vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent.163

Figure 123. Au site « irrigation » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.165

Figure 124. Au site « irrigation » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	166
Figure 125. Au site « irrigation » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	167
Figure 126. Au site « irrigation » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	168
Figure 127. Au site « irrigation » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	169
Figure 128. Au site « irrigation » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	170
Figure 129. Au site « irrigation du sol sec » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	172
Figure 130. Au site « irrigation du sol sec » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	173
Figure 131. Au site « irrigation du sol sec » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	174
Figure 132. Au site « irrigation du sol sec » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	175
Figure 133. Au site « irrigation du sol sec » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	176
Figure 134. Au site « irrigation du sol sec » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	177
Figure 135. Au site « irrigation du sol sec » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.	178
Figure 136. Aux sites « bâche 19 g/cm ² », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.	179
Figure 137. Aux sites « bâche 38 g/cm ² », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.	179
Figure 138. Aux sites « brise-vent », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.	180
Figure 139. Aux sites « irrigation sol sec », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.	181
Figure 140. Aux sites « irrigation », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.	181
Figure 141. Aux sites « machine à vent », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.	182
Figure 142. Capteur MX2201 (Onset) installé à la hauteur des fruits pour le suivi de la température de l'air, 22 juillet 2021.	183
Figure 143. Machine à vent déployée dans une trouée de brise-vent, saison 2021.	184
Figure 144. Vue détaillée de la machine à vent Tow and Blow 250 h 1) carénage, 2) moteur, 3) ventilateur, 4) bras hydraulique, 5) panneau de contrôle, 6) attache remorque pour le transport (image tirée du feuillet technique du fabricant Tow and Blow, 2022).	185
Figure 145. Tour du suivi de la stratification thermique de l'air au site machine à vent, mai 2022.	186
Figure 146. Tour du suivi de la stratification thermique de l'air au site « machine à vent », octobre 2021.	186
Figure 147. Remplissage du réservoir de diesel de la machine à vent en position abaissée.	187

Figure 148. Vue en pièces de la dérouleuse/enrouleuse spécialisée du System Hiwer a) vue montée sur tracteur, b) vue d'ensemble de l'assemblage arrière, c) vue des pièces de l'assemblage du collecteur avant (images adaptées du feuillet technique du fabricant Hiwer, Suède).....	187
Figure 149. Installation d'une bâche, 2021.	188
Figure 150. Enroulement avec système Hiwer d'une bâche pour le remisage à la suite d'une période de protection contre le gel, 25 octobre 2021.	188
Figure 151. Effet visible du réchauffement à proximité d'un brise-vent, épisode de gel 2021.	189
Figure 152. Vue aérienne des brise-vent de la bleuetière, 20 septembre 2022.	189
Figure 153. Irrigation contre le gel encore en fonction à l'aube (7 h 30), épisode de gel du 4 au 5 octobre 2021.	190
Figure 154. Glace formée sur les plants à la suite d'une irrigation contre le gel, 5 octobre 2021.....	191
Figure 155. Qualité du bleuet (d'allure vendable) n'étant pas encore affecté par les épisodes de chaleur de la mi-août à la fin-août, 12 août 2021.	192
Figure 156. Journée de « démonstration à la ferme », 20 septembre 2022.....	193
Figure 157. Résumé produit à la suite de la journée « Portes ouvertes » du 20 septembre 2022 à Normandin.....	194
Figure 158. Au site « machine à vent », courbes de niveau du site 2020 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	196
Figure 159. Au site « machine à vent » la nuit du 14 au 15 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	197
Figure 160. Au site « machine à vent » la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	198
Figure 161. Au site « machine à vent », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Il n'y a pas de présence de cuvette sur ce site.	199
Figure 162. Au site « machine à vent » la nuit du 3 au 4 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.	200
Figure 163. Au site « machine à vent » la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.	201
Figure 164. Au site « machine à vent » la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.	202
Figure 165. Au site « machine à vent » la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.	203
Figure 166. Au site « machine à vent », courbes de niveau du site 2022 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	204
Figure 167. Au site « machine à vent » la nuit du 4 au 5 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	205
Figure 168. Au site « machine à vent » la nuit du 5 au 6 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	206
Figure 169. Au site « machine à vent » la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	207
Figure 170. Au site « machine à vent » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	208

Figure 171. Au site « machine à vent » la nuit du 19 au 20 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits. Distance à la machine :	209
Figure 172. Au site « bâche 19 g/m ² », courbes de niveau du site 2020 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	211
Figure 173. Au site « bâche 19 g/m ² » la nuit du 14 au 15 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	212
Figure 174. Au site « bâche 19 g/m ² » la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	213
Figure 175. Aux sites « bâche 19 g/m ² » et « bâche 38 g/m ² », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	214
Figure 176. Aux sites « bâche 19 g/m ² » et « bâche 38 g/m ² » la nuit du 3 au 4 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits. La bâche n'était pas encore installée à cette date. ...	215
Figure 177. Aux sites « bâche 19 g/m ² » et « bâche 38 g/m ² » la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits. Bâche installée le 4 octobre, en avant-midi.	216
Figure 178. Aux sites « bâche 19 g/m ² » et « bâche 38 g/m ² » la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.	217
Figure 179. Aux sites « bâche 19 g/m ² » et « bâche 38 g/m ² » la nuit du 22 au 23 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.	218
Figure 180. Au site « bâche 38 g/m ² », courbes de niveau du site 2022 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	219
Figure 181. Au site « bâche 38 g/m ² » la nuit du 4 au 5 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	220
Figure 182. Au site « bâche 38 g/m ² » la nuit du 5 au 6 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	221
Figure 183. Au site « bâche 38 g/m ² » la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	222
Figure 184. Au site « bâche 38 g/m ² » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	223
Figure 185. Au site « bâche 38 g/m ² » la nuit du 19 au 20 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	224
Figure 186. Au site « brise-vent », courbes de niveau du site 2020 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	226
Figure 187. Au site « brise-vent » la nuit du 14 au 15 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.	227
Figure 188. Au site « brise-vent » la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.	228
Figure 189. Au site « brise-vent », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	229
Figure 190. Au site « brise-vent » la nuit du 3 au 4 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	230
Figure 191. Au site « brise-vent » la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	231

Figure 192. Au site « brise-vent » la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	232
Figure 193. Au site « brise-vent » la nuit du 22 au 23 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	233
Figure 194. Au site « brise-vent », courbes de niveau du site 2022 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	234
Figure 195. Au site « brise-vent » la nuit du 4 au 5 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	235
Figure 196. Au site « brise-vent » la nuit du 5 au 6 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	236
Figure 197. Au site « brise-vent » la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	237
Figure 198. Au site « brise-vent » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	238
Figure 199. Au site « brise-vent » la nuit du 19 au 20 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	239
Figure 200. Au site « irrigation du sol sec », courbes de niveau du site 2020 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	241
Figure 201. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	242
Figure 202. Au site « irrigation du sol sec », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	243
Figure 203. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 3 au 4 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	244
Figure 204. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	245
Figure 205. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	246
Figure 206. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 22 au 23 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	247
Figure 207. Au site « irrigation du sol sec », courbes de niveau du site 2022 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.	248
Figure 208. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 4 au 5 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	249
Figure 209. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 5 au 6 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	250
Figure 210. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	251
Figure 211. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	252
Figure 212. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.....	253

Figure 213. Au site « irrigation », courbes de niveau du site 2020 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.255

Figure 214. Au site « irrigation » la nuit du 14 au 15 septembre 2020, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.256

Figure 215. Au site « irrigation » la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.257

Figure 216. Au site « irrigation », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.258

Figure 217. Au site « irrigation » la nuit du 3 au 4 octobre 2021, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.259

Figure 218. Au site « irrigation » la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.260

Figure 219. Au site « irrigation » la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.261

Figure 220. Au site « irrigation » la nuit du 22 au 23 octobre 2021, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.262

Figure 221. Au site « irrigation », courbes de niveau du site 2022 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.263

Figure 222. Au site « irrigation » la nuit du 4 au 5 septembre 2022, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.264

Figure 223. Au site « irrigation » la nuit du 5 au 6 septembre 2022, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.265

Figure 224. Au site « irrigation » la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.266

Figure 225. Au site « irrigation » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.267

Figure 226. Au site « irrigation » la nuit du 19 au 20 septembre 2022, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.268

Liste des tableaux

Tableau 1. Emplacements de la station météo considérée selon la méthode de protection et l'année.....	7
Tableau 2. Caractéristiques des brise-vent sur les sites d'essais « brise-vent ».....	13
Tableau 3. Diagramme de flux pour le choix du type de ciel.....	33
Tableau 4. Dates où les méthodes de protection contre le gel ont été en fonction à l'automne selon l'année, l'épisode et la méthode de protection.....	36
Tableau 5. Dates où la machine à vent a été en fonction au printemps 2022.....	37
Tableau 6. Tableau comparatif des méthodes selon les éléments considérés pour la production de bleuet sauvage cultivé.....	38
Tableau 7. Aux sites « machine à vent », températures minimales moyennes au niveau des fruits et conditions météorologiques moyennes durant le gel.....	44
Tableau 8. Aux sites « brise-vent », températures minimales moyennes au niveau des fruits et conditions météorologiques moyennes durant le gel.....	46
Tableau 9. Aux sites « irrigation sol sec », températures minimales moyennes au niveau des fruits et conditions météorologiques moyennes durant le gel.....	47
Tableau 10. Aux sites « bâche », températures minimales moyennes au niveau des fruits et conditions météorologiques moyennes durant le gel.....	49
Tableau 11. Aux sites « irrigation », températures minimales moyennes au niveau des fruits et conditions météorologiques moyennes durant le gel.....	51
Tableau 12. Nombre d'années pour lesquelles chaque type de gel a eu au moins une occurrence à la station d'Environnement Canada (Normandin) pour la période 2011 à 2022 et à 2 m selon un intervalle de dates donnés.....	77
Tableau 13. Stations météorologiques utilisées pour valider les réanalyses ERA5 et sources d'information.....	106

1 Rappel du projet initial

1.1 Contexte

L'essentiel de la production de bleuets sauvages cultivés est commercialisé à l'état congelé. Cela permet de gérer un volume important de fruits et d'écouler celui-ci tout au long de l'année. Les bleuets qui sont commercialisés à l'état frais et qui empruntent le canal menant aux chaînes d'alimentation sont dans une situation plus précaire. La durée de conservation étant courte, la période de récolte détermine celle où les bleuets du Québec seront sur les tablettes. Or, la maturité est atteinte à un moment où les risques de gel augmentent et où un seul épisode de gel peut mettre un terme à l'approvisionnement du marché frais.

Accroître la consommation domestique de bleuets sauvages frais du Québec et améliorer la prévisibilité des approvisionnements d'une saison à l'autre sont des priorités du secteur. Développer davantage le marché frais est une façon d'y parvenir. Cependant, les récoltes doivent s'étaler sur une plus grande période, sans qu'un épisode précoce de gel n'occasionne de dommages aux fruits.

D'une durée d'environ quatre semaines en ce moment, l'objectif est de doubler la période de récolte pour qu'elle se prolonge jusqu'au début d'octobre. Dans ce contexte, chaque semaine supplémentaire de récolte, représente des gains en revenus pour une bleuetière et consolide la position du bleuet frais du Québec dans les chaînes.

Le risque de gel précoce peut être atténué à l'aide de différentes méthodes de protection qui ont fait leurs preuves dans d'autres productions. Or, la faisabilité, le coût, les risques et le cadre pour que cette pratique soit adoptée avec succès devaient encore être précisés pour le bleuet sauvage cultivé.

1.2 Objectifs

Ce projet pilote visait à évaluer diverses méthodes de protection des fruits contre le gel dans un contexte de production de bleuets sauvages cultivés pour le marché frais.

- 1) Mettre à l'essai des méthodes passives et actives de protection des fruits contre le gel qui sont adaptées au contexte de production du bleuet sauvage cultivé.
- 2) Identifier et détailler les risques économiques, agronomiques et environnementaux conséquents à l'adoption de chacune des méthodes à l'étude.
- 3) Déterminer les coûts pour l'adoption, selon la méthode.
- 4) Quantifier l'impact de l'adoption de cette pratique sur la diminution du risque de gel précoce lors de la période de récolte souhaitée.
- 5) Améliorer la compréhension des conditions météorologiques qui favorisent un risque élevé de gel.
- 6) Recommander un cadre d'utilisation de la pratique selon la méthode en présence.

1.3 Équipe de projet

Bleuetière Coopérative Normandin

Guy Marcil, gérant et responsable de la production

Nutrabreu

IRDA

Carl Boivin, agr., M. Sc., chercheur

Jérémie Vallée, agr., B. Sc., professionnel de recherche

Lélia Anderson agr., M. Sc., professionnelle de recherche

Mick Wu, Ph. D., biostatisticien

Sébastien Rougerie-Durocher, M. Sc., météorologue

Antoine Lamontagne, t.a., technicien agricole

Francis-Olivier Lortie, t.a., technicien agricole

Megann Desrochers, t.a., technicienne agricole

Félix Lavoie-Lochet, t.a., technicien agricole

MAPAQ

Pierre-Olivier Martel, agr., Conseiller en horticulture fruitière, DRSLSJ du MAPAQ

Evelyne Barriault, agr., Conseillère en arboriculture fruitière et viticulture, DRM-O du MAPAQ

Andrée Tremblay, Technicienne agricole, DRSLSJ du MAPAQ

Benoît Poiraudau, t.a., DRSLJS du MAPAQ

Dubois Agrinovation

Mathieu Plante et équipe

Ce projet pilote a été financé par l'entremise du Programme de développement sectoriel, mis en œuvre en vertu du Partenariat canadien pour l'agriculture, selon une entente conclue entre les gouvernements du Canada et du Québec.

Ce projet a aussi reçu un appui financier de Nutrabreu, Bleuetière Coopérative Normandin et Dubois Agrinovation.

1.4 Durée du projet

Août 2020 à décembre 2023.

1.5 Point de contact pour information

Carl Boivin

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

418 643-2380, poste 430

carl.boivin@irda.qc.ca

CE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

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

2 Faits saillants

- La performance de cinq méthodes de protection contre le gel des fruits a été évaluée en contexte de production commerciale de bleuets sauvages cultivés (machine à vent, bâche, irrigation, irrigation du sol sec avant le gel et brise-vent).
- Durant les 3 années du projet, les bleuetières hôtes situées à Normandin ont subi 40 épisodes de gel durant lesquels les méthodes de protection ont été actionnées et ont fait l'objet d'un suivi.
- La performance des méthodes de protection a été comparée en s'appuyant sur les gains de température, la fermeté du bleuet et sur les risques et bénéfices d'ordres économique, agronomique et environnemental, qui découlent de leur utilisation.
- La machine à vent a permis un gain significatif sur la température minimale et moyenne de l'air d'environ 2 °C près de la machine et l'ampleur de ce gain diminue en s'éloignant de celle-ci. La réponse a été variable selon les conditions. Le gain moyen potentiel équivaut à 30 % de la différence entre la température de l'air à 0,2 m et celle à 10 m du sol.
- L'effet de la machine à vent sur l'accumulation de gel (sous le seuil -2 °C) n'a pas été significatif. Cela s'explique par la variabilité spatiale de la protection de la machine d'une nuit à l'autre.
- Des brise-vent matures composés d'espèces de pins (7 m), dont la porosité est de 30 %, ont eu un effet significatif sur les températures minimales d'environ 1,5 à 2 °C, principalement dans les 10^{ères} m.
- L'irrigation a permis de maintenir les températures à 0 °C durant la durée d'un épisode de gel, en absence de défaillance technique.
- La bâche de 19 g/m² n'a pas eu d'effet significatif sur la température.
- La bâche de 38 g/m² a eu un effet significatif sur la température minimale d'environ 1,1 °C.
- La bâche, le brise-vent et l'irrigation ont eu un effet protecteur significatif sur la fermeté du bleuet, tandis que la machine à vent et l'irrigation du sol sec n'ont pas eu d'effet.
- Un modèle qui prédit assez bien la fermeté du bleuet à partir du nombre d'heures que ce dernier a passé sous -2 °C a été développé. Une meilleure calibration de ce modèle permettrait de prédire assez simplement, à partir de prévisions météo, le moment où la récolte destinée au marché frais se termine.
- La cartographie thermique a permis de repérer des endroits où l'air froid s'accumule dans une bleuetière. Il s'agit de zones plus basses qui sont bordées d'obstacles à l'écoulement de l'air. Cela permet de mettre en évidence que l'aménagement de « sorties d'air froid » permettrait de réduire les risques de gel sur les bleuetières où a été réalisé le projet.
- Des données de réanalyses de ERA5 des 30 dernières années, pour la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, ont servi à produire des cartes sur les types de gel. La distribution géographique de ces gels et la récurrence de la première date de gel automnal ont été étudiées.
- Les gels radiatifs sont plus fréquents en septembre et en octobre que ceux advectifs.
- Les gels radiatifs surviennent de 2 à 3 semaines plus tard au sud du Lac-Saint-Jean qu'ailleurs autour de celui-ci.

3 Dérroulement du projet

3.1 Résumé des réalisations

De 2020 à 2023, cinq méthodes de protection contre le gel des fruits ont fait l'objet d'un projet pilote en contexte de production commerciale de bleuets sauvages cultivés, à Normandin. La performance d'une machine à vent (Tow and Blow 250H), de bâches de 19 g/m² et 38 g/m² (Novagryl plus, Berry Agriculture), de brise-vent (pins matures), de l'irrigation par aspersion (LF2400LR, Rain Bird) et du maintien d'un statut hydrique du sol près de la capacité au champ, a été comparé. Cet exercice s'est appuyé sur des données issues d'un suivi en continu des conditions météorologiques, de la température de l'air à la hauteur des fruits et à 10 m du sol, de la température et de la teneur en eau volumique du sol et du changement de la fermeté du bleuet dans le temps. Il s'est aussi appuyé sur les risques technique, agronomique, économique et environnemental qui ont pu être identifiés.

Les méthodes ont été opérées en se basant sur les informations recueillies auprès des fournisseurs d'équipements et dans la littérature. Le risque de gel a été déterminé en consultant les prévisions météorologiques d'Environnement Canada et les données météorologiques mesurées sur les sites. Les méthodes « manuelles », soit la bâche et l'irrigation, ont été déployées lorsqu'une température minimale de 2 °C était prévue (2020 et 2021). En 2022, ce seuil a été augmenté à 5 °C. La machine à vent pouvait fonctionner en mode automatique. La sonde utilisée par la machine est située à 1,5 m du sol (fabricant), ce qui a compliqué la détermination d'une consigne dont la pertinence a dû être réévaluée ponctuellement (3 à 7,5 °C).

Les conditions météorologiques qui représentent un risque de gel ont aussi été investiguées de différentes façons afin d'en améliorer la compréhension. La récurrence climatique des gels au Saguenay-Lac-Saint-Jean a été étudiée afin d'obtenir des statistiques sur les dates où les premiers gels surviennent et sur le type de gel en présence. La performance d'une méthode de protection est grandement influencée par le type de gel.

En ce qui a trait à l'analyse des données récoltées sur le terrain, des cartes d'interpolation spatiales ont d'abord été produites afin de vérifier l'homogénéité de la couverture de la protection, selon la méthode. Des analyses statistiques ont aussi été menées sur les températures mesurées et sur la fermeté des fruits. Cela a permis de discuter des types de gel rencontrés et de mettre en œuvre le développement d'un nouveau modèle de prédiction de la fermeté du bleuet en fonction du nombre d'heures de gel subi par ce dernier avant la récolte.

Des risques qui sont de nature technique, agronomique, économique et environnementale ont été identifiés pour chacune des méthodes en s'appuyant sur une analyse de type « SWOT modifiée ». Cette analyse tient compte des forces, faiblesses, opportunités et menaces qui entourent les méthodes à l'essai dans ce projet.

Une analyse économique a été réalisée où les coûts annuels et la rentabilité de chacun des scénarios retenus ont été évalués.

Enfin, une synthèse de ce rapport a été produite et ce document s'intitule « Synthèse du projet – Méthodes de protection contre le gel du bleuet sauvage cultivé – Marché frais ». www.irda.qc.ca

3.2 Réalisations

Dans cette section il sera question 1) du choix des sites où la performance des méthodes a été évaluée; 2) de l'instrumentation de ces sites; 3) de l'implantation des méthodes de protection; 4) de l'opération de celles-ci; 5) de l'identification des risques; 6) des coûts; et 7) d'améliorer la compréhension des conditions météo qui représentent un risque de gel.

3.2.1 Choix des sites où ont été évaluées les méthodes de protection contre le gel

Durant les 3 années du projet, un total de 16 sites a été installé pour évaluer la performance de 5 différentes méthodes de protection contre le gel. Les essais ont eu lieu dans la MRC de Maria-Chapdelaine, où l'on retrouve 50 % des superficies en bleuets sauvages cultivés au Lac-Saint-Jean (MAPAQ, 2022). Les entreprises partenaires du projet pilote étaient la Bleuetière Coopérative de Normandin (48.783120°, -72.552329°) et Nutrableu (48.774043°, -72.539580°). Ces sites et la méthode sont identifiés à la Figure 1 par une épingle dont la couleur renseigne sur l'année, soit respectivement bleue, jaune et fuchsia pour 2020, 2021 et 2022. Pour chacun de ces 16 sites, un schéma des installations a été produit et est présenté en annexe (Annexe 1, p. 90). Respectivement pour 2020, 2021 et 2022, les schémas des sites où a été évalué la performance de la machine à vent sont présentés de la Figure 54 à la Figure 57, ceux de la bâche, de la Figure 58 à la Figure 60, ceux de l'irrigation, de la Figure 61 à la Figure 63, ceux des brise-vent, de la Figure 64 à la Figure 66 et enfin, ceux du sol sec sont présentés de la Figure 67 à la Figure 69. Les lettres A, B et C, renseignent sur l'emplacement des stations météorologiques.



Légende :

★ 2020 : bleu, 2021 : jaune, 2022 : fushia

N. B. Les épingles marquées d'une étoile représentent les stations météo

Figure 1. Emplacement des sites où les méthodes de protection contre le gel ont été mises à l'essai et les secteurs couverts par les stations météorologiques (A, B et C).

3.2.2 Instrumentation des sites et paramètres mesurés

3.2.2.1 Conditions météorologiques

Une première station a été utilisée durant les trois années du projet et cette dernière a toujours été au même endroit (Figure 2 a). Cette station a mesuré la température et l'humidité relative de l'air (HC-S3, Rotronic), la radiation solaire (LI200S, Li-Cor), la pluviométrie (TR-525M, Texas Electronics), ainsi que la vitesse et la direction du vent à 2 m du sol (05103, R.M. Young). La vitesse du vent a été mesurée à cette hauteur afin de tenir compte de l'effet des brise-vent et pour avoir une mesure représentative des conditions auxquelles a été soumise la bleuetière (la hauteur pour la mesure du vent est généralement faite à 10 m aux stations météorologiques d'Environnement Canada). Les données ont été mesurées en continu et enregistrées avec un acquiesiteur de données (CR1000, Campbell Scientific) relié à un modem cellulaire (IPn3Gb, Microhard Systems).

En 2021 et 2022, une seconde station (Climavue50, Campbell Scientific) a été installée (Figure 2 b). Cette dernière était munie des capteurs nécessaires pour mesurer la température et l'humidité relative de l'air, la radiation solaire, la vitesse et la direction du vent, ainsi que la pluviométrie. Les données ont été mesurées en continu et enregistrées avec un acquiesiteur de données (CR1000, Campbell Scientific).

L'emplacement des stations météo est représenté par une étoile à la Figure 1. Les stations ont couvert trois secteurs sur la ferme. Le Tableau 1 montre l'emplacement de chacune des stations météo considérées selon la méthode de protection contre le gel et l'année.

À la Figure 1, les épingle marquées d'une étoile représentent l'emplacement des stations selon les années et pour les trois secteurs (A, B, C) identifiés.

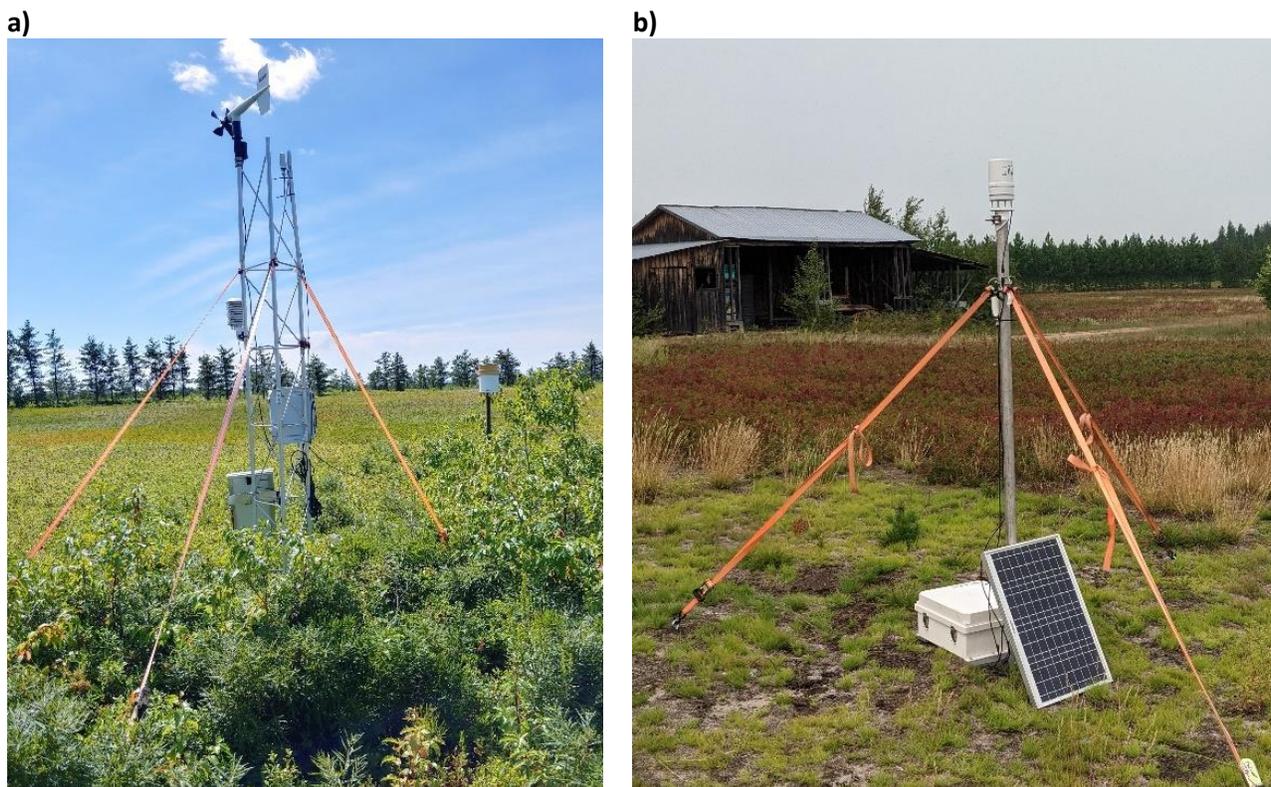


Figure 2. Stations météo a) Campbell Scientific et b) Climavue50.

Tableau 1. Emplacements de la station météo considérée selon la méthode de protection et l'année.

Méthode	Année	Secteur*
Essai automne		
Bâche 19 g/m ²	2020	C
	2021	B
Bâche 38 g/m ²	2021	B
	2022	A
Brise-vent	2020	C
	2021	A
	2022	A
Irrigation	2020	C
	2021	A
	2022	C
Machine †	2020	C
	2021	B
	2022	A
Irrigation sol sec	2020	C
	2021	A
	2022	C
Essai printemps		
Machine ³	2022	A

* Emplacement des stations telles que représentées à la Figure 1.

† Il n'a pas été possible de déployer la machine à vent à l'automne 2020. Conséquemment, un essai a été réalisé au printemps 2021 durant la floraison.

3.2.2.2 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 la température *in situ* (P_{sat}) a été déterminée. Cette P_{sat} a ensuite été multipliée 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 *in situ* de température et d'humidité relative qui ont été utilisées sont celles mesurées par les stations météorologiques.

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

3.2.2.3.1 Tous les sites

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 fruits, soit à 20 cm du sol. Ces capteurs ont un diamètre de 18 mm et une épaisseur de 17 mm (Figure 142). Ils sont munis d'un enregistreur de données qui est intégré. La température de l'air a été mesurée à intervalles de 15 minutes en 2020 et 2021 et celui-ci a été réduit à 5 minutes en 2022. Puisque la période d'intérêt, soit les épisodes de gel, survient la nuit, les sondes de mesures n'ont pas été protégées avec un abri solaire.

3.2.2.3.2 Températures de l'air et du sol aux sites « irrigation sol sec » et « bâche »

La température de l'air à 20 cm du sol sous la bâche et celle du sol à 10 cm de profondeur ont été mesurées avec une thermistance 109 (Campbell Scientific) qui a été reliée à un acquiiseur de données (CR300, Campbell Scientific). Au site « bâche », la température du sol et de l'air a été suivie sous la bâche et à l'extérieur de celle-ci. Les données mesurées ont été enregistrées à intervalles de 15 minutes en 2020 et 2021 et celui-ci a été réduit à 5 minutes en 2022.

3.2.2.4 Stratification thermique de l'air

Pour connaître la différence entre la température de l'air au niveau des fruits et celle à la hauteur de la machine durant la nuit (inversion de la température nocturne), des sondes de mesure (109, Campbell Scientific) ont été installées à 0,2 et à 9 m du sol. Pour ce faire, une tour métallique a été installée à une distance de 56 m de la machine à vent, hormis en 2020 où il n'y avait pas de machine (Figure 3, Figure 145 et Figure 146 de l'Annexe 7). Les mesures ont été enregistrées aux 5 minutes avec un acquiiseur de données (CR300, Campbell Scientific). Les données enregistrées ont pu être consultées à distance à l'aide d'un modem cellulaire (IPn3G b, Microhard Systems). En 2022, une seconde tour a été installée à une distance de 400 m de la machine à vent pour pouvoir comparer la stratification thermique de l'air entre une zone affectée par la machine et une autre qui ne l'est pas.



Figure 3. Tour utilisée pour le suivi de la stratification thermique de l'air au site « machine à vent ».

3.2.2.5 Teneur en eau volumique du sol

La teneur en eau volumique du sol a été mesurée à l'aide de sondes TDR (CS650, Campbell Scientific) pour le site « irrigation du sol sec ». Ces sondes ont permis d'identifier le statut hydrique du sol qui correspond à la capacité au champ (CC) et aussi, la durée d'un épisode d'irrigation à effectuer pour ramener le sol à la CC en amont d'un épisode de gel. Les données ont été enregistrées aux 15 minutes avec un acquiiseur (CR300, Campbell Scientific) relié à un modem cellulaire (IPn3Gb, Microhard Systems).

3.2.2.6 Fermeté des fruits

La fermeté des bleuets a été mesurée à quatre reprises en 2022 (7 au 26 septembre) avec le Pénétrromètre à fruit FT-02 (QA supplies) monté sur un support qui est compatible avec la prise de mesures manuelles (Figure 4 a). Un embout de 3 mm a été utilisé, ce qui implique que les unités de mesure utilisées dans ce rapport sont des g/3 mm et qu'elles n'ont pas été converties en unité de « pression » (Figure 4 b et c). Comme la température du bleuets influence sa fermeté, les bleuets ont été mesurés à une température constante. Ils ont été cueillis, puis réfrigérés à 4 °C et soumis à la mesure 12 h plus tard. Des « points » de mesures ont été désignés et leur nombre déterminé à la suite de deux prises de mesures initiales pour évaluer la variance. Les bleuets utilisés pour effectuer ces mesures ont toujours été situés près d'une sonde de température (MX2201, Onset) et les points de récoltes sont identifiés par un cercle, dont le centre est marqué d'une croix, aux schémas des installations présentés à l'Annexe 1 (de la Figure 54 à la Figure 69). Au champ, à chaque point de mesure, un total de cinq ramets (tiges) supportant une grappe de fruits a été récolté aléatoirement, puis mis au frais immédiatement dans un sac « gonflé » pour éviter d'écraser les fruits. Au laboratoire, pour chacune des grappes, un bleuets d'allure vendable (Figure 4 d) a été sélectionné pour effectuer la mesure de la fermeté avec le pénétrromètre.

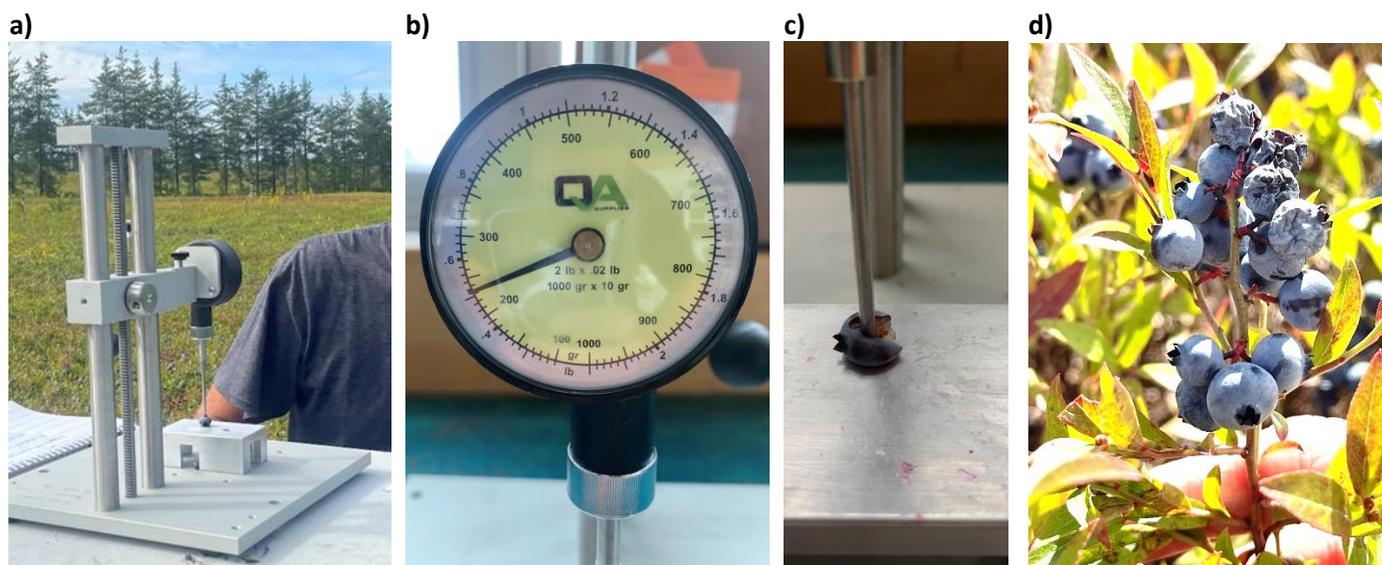


Figure 4. Pénétrromètre à fruit (FT-02, QA supplies) utilisé pour les tests de fermeté : a) vue d'ensemble lors de test, b) cadran, c) embout de 3 mm, d) tige portant une grappe avec bleuets d'allures vendables et d'allures non vendables (ratatinés), 15 septembre 2022.

Il n'a pas été possible d'évaluer la qualité du bleuets en 2021, car il s'agit d'une année qui a été particulièrement soumise aux extrêmes climatiques. Elle a débuté avec un gel important des fleurs, qui a été suivi d'une saison estivale anormalement propice au stress hydrique. Le premier gel est survenu tard en saison, soit en octobre, alors que le projet vise à protéger les bleuets jusqu'au 1^{er} octobre. Les plants, sur lesquels la qualité des fruits devait être évaluée pour mesurer l'impact des méthodes de protections, sont donc restés « en attente » pour une période plus longue que prévu. Lorsque les épisodes de gel sont survenus, la dégradation du fruit était telle, qu'il a été impossible d'évaluer la performance des méthodes de protection en se basant sur la qualité du fruit (fermeté) comme critère (Figure 4 d).

3.2.3 Planter des méthodes de protection contre le gel

Les méthodes de protection contre le gel évaluées peuvent être regroupées selon qu'elles soient actives ou passives.

3.2.3.1 Méthodes actives

Les méthodes actives de protection contre le gel sont utilisées durant l'épisode de gel. Les méthodes actives évaluées dans ce projet étaient la machine à vent, l'irrigation et les bâches (où plusieurs densités ont été testées).

Machine à vent

La machine à vent utilisée dans ce projet (Figure 5, et Figure 143 et Figure 144 de l'Annexe 7) est le modèle mobile 250H de la compagnie Tow and Blow (Nouvelle-Zélande). Elle 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 vertical de 360°. Le degré de rotation sur l'axe vertical peut être ajusté via des butées de pivotement. L'air est soufflé à 82 km/h suivant une trajectoire légèrement inclinée vers le sol (ajustable entre 1° et 14°). La vitesse de rotation (tours par minute) est également réglable.

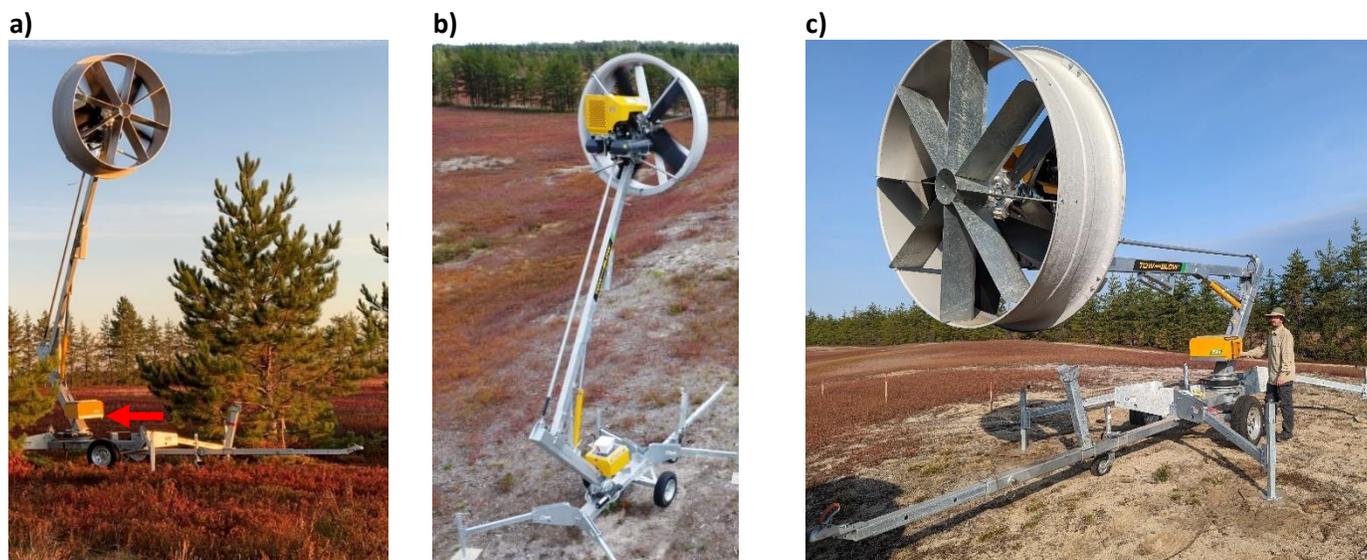


Figure 5. Machine à vent a) vue de face et positionnement de la sonde de température sous le boîtier de contrôle (flèche rouge), b) vue d'arrière et c) vue lors de la montée/descente avec le bras hydraulique.

La machine à vent peut être actionnée manuellement ou automatiquement. Le mode autonome dépend d'une consigne de départ qui s'appuie sur une valeur de température de l'air mesurée au niveau du boîtier de commande, soit à 1,5 m du sol (Figure 5, a). La hauteur de cette sonde n'est toutefois pas représentative de la température de l'air au niveau des fruits, qui eux, sont situés à 20 cm. Une température de démarrage plus élevée que 0 °C doit donc être programmée, car la température au niveau des fruits est généralement plus froide que celle à la hauteur du boîtier. L'équipe de vente de la machine peut offrir un soutien technique pour le choix de l'emplacement de la machine en fonction du terrain et pour trouver la bonne température de réglage pour le démarrage. Ce service n'a toutefois pas été sollicité dans le cadre de cette étude. Un tel service conseil est également disponible au Québec, mais de la part d'experts en protection contre le gel qui œuvrent plus couramment dans le secteur de la vigne. Selon Tow and Blow (2022), il serait aussi possible d'abaisser la sonde de température, mais en raison du filage, la machine ne pourrait pas faire une rotation complète de 360° et serait donc contrainte à un maximum de 355° sur un mode « aller-retour ». La compagnie ne prévoyait pas, en 2022, d'option pour abaisser la sonde de température dans le développement des prochains modèles (Tow and Blow, 2022). L'appareil possède un réservoir de diesel qui lui permet d'avoir une autonomie d'environ 12 heures. Cela implique de devoir faire le plein entre chaque événement de gel.

Une unité de communication (la *Smart Connect unit*) via une application sur un téléphone permet de suivre l'état de la machine à vent en temps réel (*Smart Connect Telemetry System*). L'unité de communication, qui était en cours de mise à jour par la compagnie au moment du projet, n'a pas pu faire l'objet d'une évaluation. En 2022, l'ajout d'un tel système à une machine déjà commandée coûtait 2 200 \$ + taxes (incluant la livraison). À cela s'ajoute un forfait avec frais mensuels d'environ 30 \$ qui peut être acheté sous forme de « contrat » d'un nombre de mois prédéterminé.

Il était prévu que la machine à vent soit à l'essai durant les trois années du projet. Cependant, le projet a reçu l'autorisation de débiter en août 2020, ce qui ne laissait pas assez de temps pour recevoir la machine avant les premiers gels. Le profil vertical des températures a quand même été caractérisé à l'automne 2020. Aussi, pour bonifier le jeu de données associées à l'effet de la machine sur les températures, des déploiements ont été faits au printemps 2022 (2 épisodes de gel).

Bâche

Des bâches Novagryl plus (Berry Agriculture) en polypropylène non tissées (Dubois Agrinovation, 2023) ont été testées (Figure 149, Figure 150 et Figure 156 de de l'Annexe 7). En 2020, une bâche de 19 g/m² a été utilisée. Cette dernière couvrait une surface de 0,62 ha, soit 20,4 m x 305 m. En 2021, vu la faible performance observée pour cette bâche, des épaisseurs simple et double ont été évaluées. Cela portait ainsi la densité de la double épaisseur à 38 g/m². Effectivement, une problématique liée à la résistance de la bâche de 19 g/m² a eu lieu. L'action du vent et de la manutention (installation/désinstallation) a déchiré une grande partie de la bâche du site où l'épaisseur « simple » était testée. Les mesures effectuées après le 10 octobre n'ont donc pas été retenues pour ce site. Une grande partie de la bâche de 19 g/m² a dû être jetée.

Vu la faible durabilité du matériel de la bâche de 19 g/m², une bâche plus épaisse a été testée à la dernière année du projet. En 2022, c'est donc une bâche d'une densité de 38 g/m² qui a été utilisée. Cette dernière couvrait une surface de 0,25 ha, soit 16,5 m x 153 m.

La manipulation des bâches s'est effectuée à l'aide de la dérouleuse/enrouleuse spécialisée *System Hiwer* (Figure 148 et Figure 150) pour la majorité des installations. Les bâches ont été maintenues au sol avec des sacs de sable qui sont destinés à cet usage.

Irrigation

Le système d'irrigation était composé de gicleurs (LF2400LR, Rain Bird) (Figure 6 ici-bas et Figure 153 de l'Annexe 7). Ces gicleurs étaient équipés d'une buse grise foncée de 4,37 mm de diamètre. Le débit théorique d'un gicleur est de 25,8 lpm à 4,1 bars (pression d'opération du système). Le système d'irrigation a été installé à la surface du sol et ce dernier était constitué de tuyaux en polyéthylène haute densité (HDPE). La tête des gicleurs était supportée par des tiges métalliques qui assuraient leur ancrage. L'espacement entre les gicleurs (sur la ligne secondaire) a été de 18,3 m et l'espacement entre les lignes secondaires a été de 15,2 m. Les gicleurs ont été disposés selon un patron triangulaire. La précipitation théorique est de 4,1 mm/h pour une distribution de l'uniformité de 0,69 (Rain Bird, 2021). La quantité d'eau appliquée, pour une protection de 10 h, correspondait à 425 m³/ha. La pompe était actionnée par la prise de force du tracteur.



Figure 6. Aux sites « irrigation » : a) gicleurs b) vue d'ensemble du système d'irrigation et c) pompe actionnée par la prise de force du tracteur.

3.2.3.2 Méthodes passives

Les méthodes passives de protection contre le gel (fleurs printemps/fruits automne) sont utilisées avant un épisode de gel. En général, il peut s'agir : du choix du site, de l'aménagement de brise-vent, de la fertilisation, de la gestion phytosanitaire, de l'irrigation (du sol sec), du recouvrement des cultures ou encore, de la sélection de cultivars. Puisqu'il s'agit de bleuets sauvages, la sélection de cultivars n'est pas une solution, du moins pour les 34 000 ha qui sont actuellement aménagés pour la production au Québec. Dans le cadre du projet, les méthodes passives évaluées étaient l'irrigation du sol sec et le brise-vent.

Irrigation du sol sec

L'irrigation du sol sec, méthode qui sera nommée « irrigation sol sec » pour la suite du rapport, consiste à augmenter la teneur en eau du sol avant un épisode de gel. Pour les trois années d'essais, l'irrigation du sol sec a été faite à une reprise par automne. Le type de système d'irrigation et la pompe étaient les mêmes que ceux décrits pour la mesure active d'irrigation durant le gel (sur un site voisin) à la section 0. Le statut hydrique du sol a été vérifié avant les événements de gel via des sondes de teneur en eau.

Brise-vent

Les haies brise-vent sont des aménagements agroforestiers bien présents dans le système cultural du bleuet sauvage cultivé au Québec (Figure 151 et Figure 152 de l'Annexe 7). Les haies brise-vent à l'étude étaient composées de pins gris et de pins rouges d'une hauteur approximative de 7 m.

Dans le cadre de cette étude, les brise-vent étaient déjà en place et l'effet de ceux-ci a été documenté au même titre que les autres méthodes de protections mises à l'essai. Les caractéristiques des brise-vent sont présentées au Tableau 2.

La porosité (pourcentage de vides apparents) a été estimée via une analyse par image (ImageJ, Rasband 1997-2018). Les brise-vent ont été photographiés à l'hiver 2023. Chaque photo a été découpée en deux sections : milieu et bas de chaque brise-vent. La porosité moyenne par site d'essai est présentée au Tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques des brise-vent sur les sites d'essais « brise-vent ».

Essai	Espèces	Espacement (cm)	Largeur haie (cm)	Hauteur (m)	Dia. tronc (cm)	Âge approx. (an)	Porosité (%)
2020	Pin rouge et gris	210	301	6,8	15	15	37
2021	Pin rouge et gris	218	229	7,1	15	15	28
2022	Pin rouge	186	208	7,2	16	16	29

3.2.4 Opérer des méthodes de protection

3.2.4.1 *Que dit la littérature?*

Quelle est la résistance au gel du bleuets? Quels sont les types de gels et quels sont les facteurs qui favorisent le risque de gel? Cette section a comme objectif de répondre à ces questions.

La résistance au gel automnal du bleuets

Avant de parler de conditions météo, que dit la littérature sur le gel que peuvent tolérer les fruits et quel impact le gel aura sur le fruit et sa qualité?

Une gelée avant la récolte est néfaste à divers niveaux sur la qualité du bleuets sauvage cultivé. Elle peut :

- Faire disparaître la pruine (couche protectrice recouvrant les bleuets), ce qui nuit à la conservation du fruit récolté (Brassard et coll., 2014);
- Causer un ramollissement et une déshydratation du bleuets (Brassard et coll., 2014);
- Accélérer l'abscission des bleuets mûrs (Desjardins, 2014);
- Augmenter la proportion de fruits verts à la récolte (Desjardins, 2014).

Le seuil de $-2,2\text{ °C}$, soit l'équivalent de 28 ° en Fahrenheit, a été identifié comme critique pour le gel en bleuetsière (Desjardins, 2014). Il y a toutefois très peu d'information disponible sur la résistance au gel des fruits du bleuets sauvage cultivé.

Selon Brassard et coll. (2014), les fruits, les bourgeons végétatifs et les tiges sont sensibles au gel, mais à un degré moindre que les fleurs. C'est aussi la remarque de Cline (1998). Ce dernier mentionne aussi qu'avec le grossissement de la baie, la sensibilité de celle-ci est similaire à celle des fleurs ouvertes dont la température critique est de $-2,2\text{ °C}$. La durée après laquelle le bleuets sauvage subit des dommages irréversibles sur sa qualité est inconnue. Toutefois, l'étude Hicklenton (2002) mentionne que les fleurs ouvertes et celles appelées à ouvrir subissent des dommages sévères si la température descend sous $-3,5\text{ °C}$ pendant plus de 2 heures.

La fermeté est un critère d'importance pour le consommateur et pour garantir une efficacité à la récolte. Un bleuets trop mou va être plus difficile à récolter.

Au Saguenay et au Lac-Saint-Jean, des notes techniques recueillies par Joseph Savard du MAPAQ (cité dans Boivin et coll., 2019) permettent d'identifier la productivité du secteur des bleuets de 1986 à 2005 en incluant aussi les causes probables associées aux dommages ou aux pertes de rendement. Sont répertoriées les années et l'intensité des dommages liés aux : gels hivernaux, gels printaniers tardifs, gels pendant la production des fruits, sécheresse, et autres facteurs biotiques. Le gel pendant la production des fruits a causé des dommages partiels en 1987, 1999, 2000, et 2022 (période 1986-2005). La récurrence est d'environ de 1 année sur 5. Le peu d'intérêt porté par la littérature au synchronisme fruit-gel s'explique possiblement par le principal marché qui est visé (95 % transformation) et le moment où sont récoltés les fruits qui approvisionnent ce marché.

Selon une analyse sur le climat futur de Boivin et coll. (2019), le risque associé au synchronisme fruit-gel est de 0,0 à 0,9 jour (marché de la congélation). Il n'y a pas de différence entre les scénarios de climat futur et actuel. Les tendances passées pourraient ainsi se maintenir.

Il est à noter que le dommage causé par un synchronisme fruit-gel pourrait prendre plus d'ampleur dans un contexte où le bleuets sauvage cultivé tente d'accroître sa place sur le marché frais.

3.2.4.1.1 Types de gels

Le gel peut être catégorisé en trois types : 1) advectif (*advective freeze*); 2) radiatif; et 3) mixte (couramment appelé « gel/gelée » ou « *frost/freeze* » en anglais) qui sont une combinaison entre les gels advectif et radiatif. La clé diagnostique des types de gels, tel que présenté par le MAPAQ (2014) fait une synthèse des risques de gel selon la température, la température du point de rosée, la vitesse du vent et la couverture nuageuse (Figure 7).

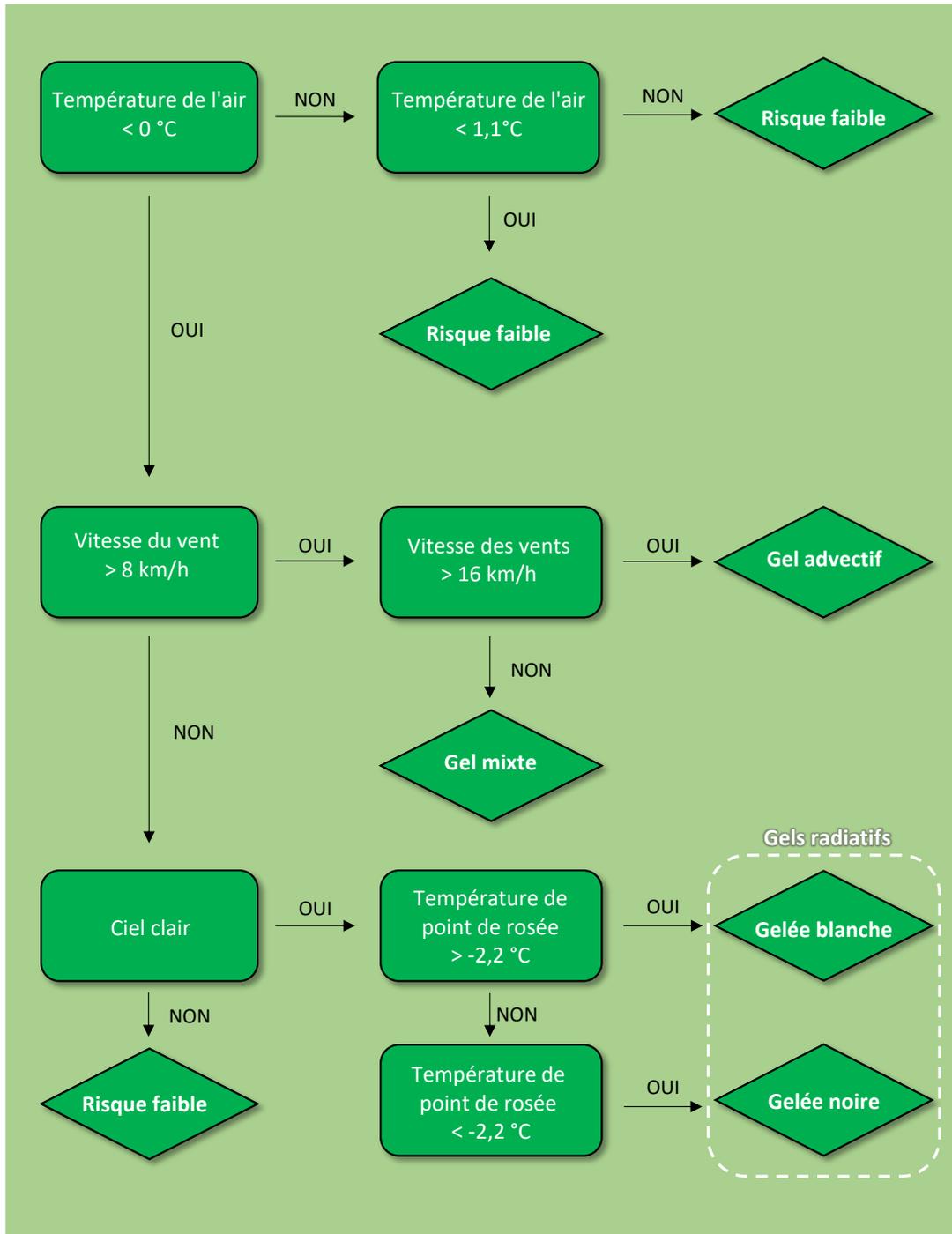


Figure 7. Clé diagnostique des risques de gels en fonction des conditions, figure adaptée de Poling (2008) et de MAPAQ (2014).

Gel radiatif

Le type de gel automnal le plus courant dans les bleuetières du Québec serait le radiatif (Bellemare et coll., 2017). Ce type de gel est caractérisé par un ciel clair durant la nuit, des vents très faibles voir absents < 8,0 km/h (Perry, 1998; Quéno et Beltrando, 2007; Poling, 2008) et une inversion de température (Barriault et Gosselin, 2014). L'énergie est perdue par radiation depuis la surface du sol vers l'atmosphère. En conditions calmes (vents faibles), s'il y a présence de nuages, le sol ne se refroidira pas aussi vite, mais une inversion de température peut toutefois être présente, bien que moins forte que durant une nuit où le ciel est dégagé.

Un gel radiatif avec un point de rosée > 2,2 °C est une gelée blanche (« *hoar frost* » ou « *white frost* »). Ce type de gel survient lorsque l'humidité de l'air est élevée. Le taux de perte de chaleur est partiellement déterminé par la quantité d'humidité dans l'atmosphère (Bellemare et coll., 2017). Un ciel nuageux permettra à une partie du rayonnement de retourner vers le sol et va diminuer la perte de chaleur (Bellemare et coll., 2017).

Un point de rosée < 2,2 °C est une gelée noire (« *black frost* » en anglais). La gelée noire est caractérisée par un temps sec et sans réflexion possible, contrairement à la gelée blanche, les pertes de chaleur sont donc plus grandes. Ce sont ainsi des gels de forte intensité. Ils sont toutefois plus rares (Bellemare et coll., 2017).

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, le gel radiatif est généralement caractérisé par une inversion de température. À ce moment, l'air chaud monte, alors que l'air froid, plus dense et plus lourd, s'accumule au sol. Cela est vrai pour les terrains plats alors que pour les terrains trop accidentés, l'air se draine dans le sens de la pente (Bellemare et coll., 2017).

Gel advectif

Le gel advectif est associé au déplacement d'une masse d'air froid dans une région, donc accompagné de vents forts dont la vitesse est supérieure à 16 km/h (Barriault et Gosselin, 2014). Ces gels peuvent être caractérisés par un ciel clair ou nuageux. Le brassage de l'air par le vent ne crée pas de condition propice à l'inversion de température lors de ce type de gel. Ce type est le plus difficile à contrôler.

Gel mixte

Des conditions combinant les caractéristiques du gel radiatif et celui advectif, vont créer un gel de type « mixte », il est aussi appelé « gel/gelée », « gel par évaporation » ou « frost/freeze » dans la littérature. Les vents sont d'intensités moyennes, mais soutenues pour toute la durée du gel. Ce type de gel est caractérisé par une longue durée, souvent plus de 10 h, ce qui rend la lutte active difficile (Barriault et Gosselin, 2014).

3.2.4.1.2 Identifier les risques de gel sur la bleuetière

Le risque de gel est variable d'un endroit à l'autre sur une bleuetière (Barriault, 2022). À partir des données météo à grande échelle, il est presque impossible de prédire le risque de gel à si petite échelle, car il peut y avoir de grandes différences à l'intérieur d'une même ferme (Barriault, 2022). Dans un contexte où les rendements sont sensibles aux gels, un suivi des températures à la hauteur des fruits et en hauteur (10 m), afin de vérifier s'il existe une inversion de température, devrait être effectué directement à la ferme (Barriault, 2022).

Au Québec, le climat local et la susceptibilité au gel d'un site sont des facteurs très déterminants pour le potentiel viticole, et conséquemment, pour le choix d'un emplacement pour l'implantation d'un vignoble (Barriault et coll., 2013). Les bleuetières, quoiqu'ils doivent être aménagés, n'ont pas besoin d'être implantées. Toutefois, la récolte du bleuets sauvage cultivé destiné au marché frais vise normalement une petite proportion de la superficie d'une ferme. Le choix du secteur de la bleuetière, exploité pour le marché frais, devrait s'appuyer sur une démarche compréhensive où les facteurs locaux affectant les risques de gel ont été évalués. La section ci-dessous décrit les facteurs qui font varier le risque de gel sur une bleuetière. Bien connaître les zones sensibles peut aussi aider à orienter une stratégie de récolte qui priorise les zones les plus sensibles au gel.

Pente

La pente joue notamment sur la quantité de radiation solaire que reçoit la surface du sol et sur l'écoulement de l'air (section « Topographie » ci-dessous). Dans le cas de collines, l'orientation et l'aspect de la pente influencent la quantité de rayonnement solaire reçu, l'évapotranspiration et la teneur en eau du sol (Radcliffe, 1981). Lorsque la végétation est située dans une partie convexe d'une colline, elle a moins de risques de subir des gels radiatifs qu'une canopée exposée ou située dans une partie concave (Lindkvist et coll., 2000).

Topographie

La topographie peut influencer les conditions météorologiques locales en favorisant un écoulement des masses d'air froid sur la ferme. Cet écoulement est surtout important en conditions de gels radiatifs. L'intensité d'un type de gel radiatif ou advectif varie selon la position d'un champ dans une région qui présente des ondulations de terrain. Les parties creuses d'un champ sont plus susceptibles au gel.

L'écoulement d'air froid est comparable à de la mélasse qui se déplace sur une surface inclinée (Evans, 2000). Durant un épisode de refroidissement radiatif, l'air se refroidit, se comprime et devient plus dense, causant sa descente vers le creux d'une vallée. La vitesse de déplacement d'une masse d'air froid serait typiquement de 3,5 à 7,2 km/h. Elle peut être guidée afin de minimiser son impact sur la culture.

Pour deux milieux végétatifs de même altitude, les risques de gel sont plus élevés lorsque la végétation est située au bas d'une vallée étroite, qu'un champ dans une plaine (Lindkvist et coll., 2000). En considérant un fort dénivelé, l'effet de l'altitude sur la diminution de la température est d'environ de 10 °C/km. Ce sont les changements de pression dans l'air qui sont responsables de cette baisse de température. Toutefois, les bleuétières sont typiquement sur des terrains de type plaine.

Aménagement de la bleuétière

L'aménagement de sorties d'air à des endroits clés (sans risques pour la culture) peut se faire via : 1) l'ouverture de corridor d'au moins 15 m de largeur au travers des boisés, buttes, digues et autres obstacles à l'écoulement d'air (Argall et Chiasson, 1996; Bellemare et coll., 2017) ou 2) en coupant les branches à la base des arbres sur les 90^{ers} cm pour permettre le passage de la masse d'air froid (Argall et Chiasson, 1996). L'utilisation de cartes topographiques (ex. : Info-Sols, 2023), peut aider à détecter les zones où il y a plus de probabilité d'accumulation d'air froid (ex. : Ikani, 2022). Bien que l'éclaircissage du boisé ou élagage des branches basses puisse contribuer à diminuer globalement le risque de gel, il arrive que cela l'accroisse en contrebas (OMAFRA, 2023a). Consulter un conseiller expérimenté peut favoriser une meilleure prise de décision pour l'aménagement de la ferme.

En forêt, le risque de gel est plus élevé dans les clairières de petite étendue et il continue d'augmenter jusqu'à ce que la clairière couvre environ 1 ha (OMAFRA, 2023a). Toutefois, au-delà d'une étendue de quelques ha, le risque de gel diminue généralement, car la circulation de l'air est rétablie (OMAFRA, 2023a).

Étendue d'eau

La présence d'eau, qu'elle soit sous forme liquide, comme dans un lac ou une rivière, ou sous forme de vapeur, a un effet sur la température de l'air. Des champs agricoles situés à proximité d'étendues d'eau sont exposés à des risques de gel plus faibles que les champs qui en sont plus éloignés. En période nocturne, la température de l'étendue d'eau est généralement plus élevée que celle de l'air, ce qui cause un réchauffement de celui-ci. Inversement, durant le jour, l'évaporation de l'eau ajoute des molécules de vapeur dans l'air, ce qui le rend plus humide et plus difficile à réchauffer.

L'effet protecteur des rivières ou des lacs qu'a sur la diminution du risque de gel pourrait s'étendre jusqu'à 5 km, mais il y a une forte dépendance au volume de l'étendue d'eau (Louka, 2020). Les régions situées à 1 km de rivières seraient, en moyenne dans une année, 2 °C plus chauds que les régions qui en sont plus éloignées (Fridley, 2009). Les effets de pente et du couvert végétal sont souvent négligeables lorsque le milieu végétatif d'intérêt, qu'il s'agisse d'une forêt ou d'un champ agricole, est situé à proximité d'une large étendue d'eau (Pouteau, 2011).

Vents

La vitesse du vent augmente de façon logarithme avec la hauteur. De plus, elle est influencée par la rugosité du terrain. Autrement dit, la configuration du paysage (boisé, brise-vent, immeubles, collines, vallées, etc.) va modifier la vitesse du vent et sa stabilité (turbulences).

Stations météo utilisées pour l'évaluation des risques de gel

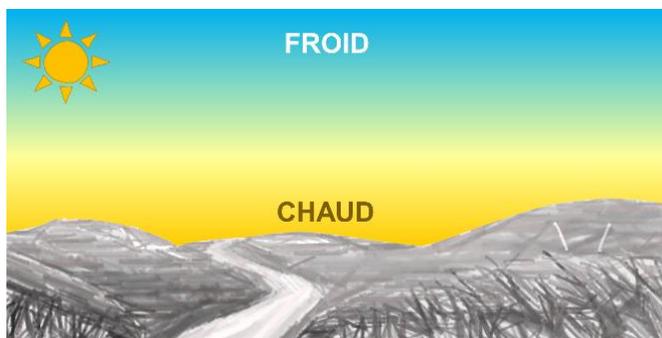
Lors de l'interprétation des prévisions de gel pour sa ferme, il est important de prendre en compte les différences qui peuvent exister entre l'environnement de celle-ci et celui de la station météo considérée. Ces différences peuvent être des éléments de paysages précédemment décrits. Lorsqu'il n'est pas possible de mesurer la température, de façon précise sur son site, une réflexion doit être faite pour déterminer si la température qui est désignée comme seuil d'intervention devrait être plus faible ou plus élevée qu'à la station utilisée pour la prévision. De plus, ce seuil pourrait différer selon l'emplacement sur la ferme.

3.2.4.1.3 Conditions gagnantes

Bien qu'il y ait beaucoup de littérature qui porte sur la protection contre le gel pour le bleuets en corymbe (ex. : Smith, 2019) et pour d'autres cultures situées au niveau du sol comme la pomme de terre ou la fraise, il y a très peu d'information disponible sur la protection contre le gel du fruit pour le bleuets sauvage cultivé.

Machine à vent

a) Conditions diurnes



b) Conditions nocturnes d'inversion de température

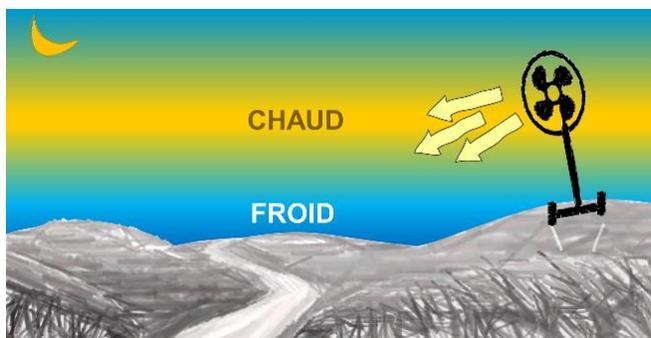


Figure 8. Schéma simplifié de la stratification thermique de l'air en fonction du moment de la journée pour a) le jour et b) les nuits où il y a présence d'inversion des températures.

Le principe de fonctionnement de la machine à vent est de rabattre la masse d'air chaud située en hauteur (résultant de l'inversion de température nocturne) vers le sol (Figure 8). La machine fonctionne bien en condition de gel radiatif qui est caractérisé par une inversion de température (faibles vents présents). En condition advective, l'efficacité est nulle, car il n'y a pas d'inversion de température. La machine contribue également à assécher les tissus végétaux, ce qui les rend moins sensibles (Barriault, 2022).

L'inversion peut être utilisée pour prédire le gain de température et la superficie qui sera protégée (Ribeiro, 2006). Toutefois, la proportion de l'inversion qui se traduit en gain varie selon la littérature : de 30 % selon Ribeiro (2006), de 30 à 50 % selon Wilson (2001), jusqu'à 50 % selon Heusinkveld et coll. (2020), et en contexte de gel printanier ce gain est de 25 % selon Bellemare et coll. (2017), et de 21 à 41 % selon Anderson et coll. (2022). Ces relations sont toutefois pour des machines différentes (niveau de puissance, fixe ou mobile, etc.) et/ou des contextes de production différents (culture, moment de l'année, régions dans le monde). Le réchauffement potentiel que la machine peut apporter à la culture est proportionnel à la puissance de l'appareil et inversement proportionnel à la distance culture-machine (Ribeiro, 2006; Heusinkveld et coll., 2020 et Anderson et coll., 2022). En relation avec la distance, le réchauffement pourrait diminuer, de 35 % (forte inversion) à 70 % (faible inversion) pour chaque 100 m, selon Ribeiro (2006).

Certains facteurs font que la machine ne fournit pas une protection uniforme. Premièrement, l'efficacité de la machine varie spatialement et elle est susceptible à la dérive due au vent (Ribeiro, 2006). L'efficacité de la machine décroît lorsque la vitesse du vent augmente (Heusinkveld et coll., 2020). La superficie protégée serait allongée lorsque l'air est soufflé dans la direction du vent et réduite en sens opposé à celui-ci (Ribeiro, 2006; Heusinkveld et coll., 2020). La stabilité de l'atmosphère n'est pas constante au cours de la nuit (Ribeiro, 2006), donc l'efficacité de la machine peut aussi varier dans le temps. Finalement, la protection de la machine est influencée par la topographie. L'efficacité serait accrue dans le sens de la pente descendante et réduite dans le sens de la pente montante (Wilson, 2001). Un site avec une plus faible pente permettrait à la machine de protéger une plus grande superficie (Wilson, 2001).

La protection offerte par la machine serait maximisée si la vitesse de rotation de celle-ci est plus lente (3 à 6 minutes/tour) (Heusinkveld et coll., 2020). Le gain de température serait maximisé en orientant l'angle du ventilateur presque horizontalement entre 8 et 16 ° selon Heusinkveld et coll. (2020). Comme l'effet réchauffant de la machine est instantané, il n'est pas nécessaire de la déployer à l'avance, à la condition d'avoir étalonné la sonde de température de la machine.

Le contexte de production du bleuet sauvage cultivé implique généralement une récolte aux deux ans, pour un champ donné. Conséquemment, l'utilisation d'une machine mobile y est mieux désignée comparativement aux machines fixes. Beaucoup d'études qui s'intéressent aux machines à vent portent sur des unités qui sont fixes. Ces dernières sont généralement de plus grande puissance que celle testée dans ce projet pilote.

Haie brise-vent

Le brise-vent influence la température à l'échelle d'une parcelle, car il modifie le bilan radiatif. Cet effet varie entre autres selon le moment de la journée (nuit, jour) le type de conditions (refroidissement radiatif vs advectif), le type de brise-vent (hauteur, longueur, porosité, essence d'arbre, etc.) et l'orientation du brise-vent par rapport à la configuration du terrain (pente).

À l'intérieur d'une parcelle, l'ensemble des composantes du bilan radiatif de grande et de courte longueur d'onde est modifié par la présence de brise-vent. L'effet de brise-vent sur le rayonnement de grande longueur d'onde est illustré à la Figure 9, a, et l'effet sur le rayonnement solaire direct de courte longueur d'onde est illustré à la Figure 9, b.

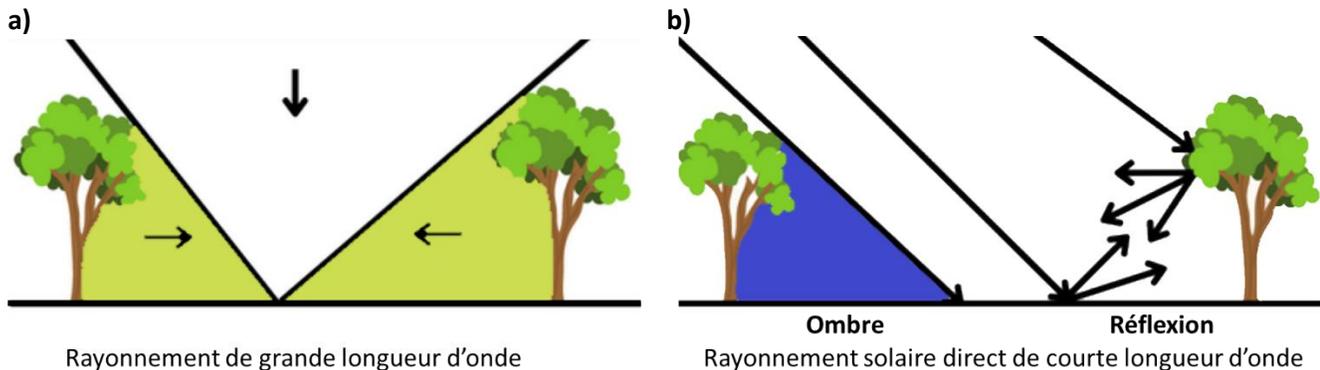


Figure 9. Schémas illustrant les effets des brise-vent à l'échelle parcellaire sur les échanges radiatifs. Rayonnement a) de grande longueur d'onde (rayonnement des haies et rayonnement atmosphérique) et b) de courte longueur d'onde (rayonnement solaire direct soit ombre et réflexion). Figure adaptée de Guyot (1997).

Condition radiative (terrain plat) : Au cours d'une nuit où le vent est faible, les facteurs essentiels à la variation du bilan radiatif sont l'apport radiatif des haies et la répartition des températures de la surface du sol (Guyot, 1997). L'apport radiatif des haies serait sensible sur une distance de l'ordre de 2 à 3 fois leur hauteur (Guyot, 1997; Quénot et Beltrando, 2007). Cela se traduit par un risque de gel moins élevé dans la zone près du brise-vent (Figure 10).

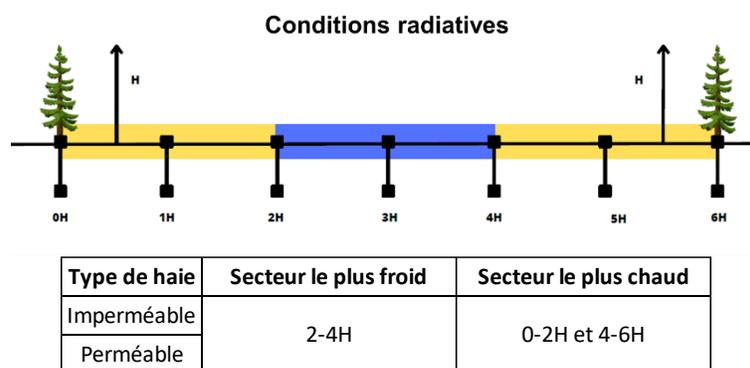


Figure 10. Schématisation de la variabilité spatiale des températures nocturnes en condition radiative, pour des haies perméables ou imperméables. Figure adaptée de Quénot et Beltrando (2007).

Condition radiative (terrain en pente) : En situation radiative, la perméabilité et la position de la haie par rapport aux écoulements gravitaires (blocage d'air froid) sont les facteurs les plus influents sur l'évolution microlocale des températures nocturnes (Quénol et Beltrando, 2007). Les obstacles sur le terrain (p. ex. brise-vent, fossé, boisé) guident la masse d'air froid dans le sens de la pente. L'écoulement de l'air froid peut être comparé à de la mélasse qui s'écoule sur un plan incliné. Un mauvais aménagement des obstacles sur le terrain peut emprisonner la masse d'air froid à l'intérieur d'une zone de culture sensible.

- Pour une parcelle bordée par une haie imperméable qui ne bloque pas les écoulements gravitaires, c'est essentiellement l'effet de la réémission du rayonnement infrarouge de cette dernière qui agit sur les températures nocturnes (Quénol et Beltrando, 2007). Dans ces conditions, Quénol et Beltrando (2007) ont observé un écart thermique moyen de 1°C, avec des écarts extrêmes pouvant dépasser 2 °C, entre la zone près des haies et le milieu de la parcelle.
- Pour une parcelle exposée à des entrées d'air froid conséquent à un écoulement gravitaire et bordée d'une haie imperméable faisant barrage à l'écoulement de celui-ci, cela crée un ralentissement de l'écoulement qui provoque une stagnation de l'air. Par conséquent, cela accentue le refroidissement en amont de l'obstacle (Quénol et Beltrando, 2007) (Figure 11, haut). Quand la haie est perméable, le secteur le moins froid est dans la zone près des brise-vent (Figure 11, bas).

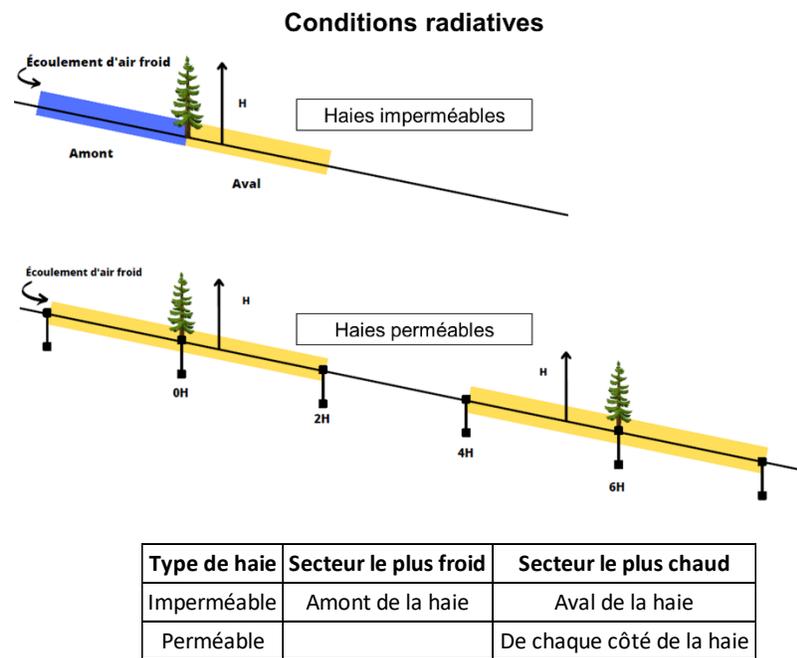


Figure 11. Schématisation de la variabilité spatiale des températures nocturnes en condition radiative en terrain incliné pour (en haut) des haies imperméables et (en bas) des haies perméables. Figure adaptée de Quénol et Beltrando (2007).

Il y a plus d'hétérogénéité des températures en conditions venteuses. Au cours d'une nuit claire et venteuse, si les températures ne sont pas trop négatives, le brassage de l'air peut avoir comme avantage de limiter le gel. Toutefois, le ralentissement du vent au voisinage du brise-vent peut causer un refroidissement plus grand à proximité de la haie, car cela accentue les pertes radiatives à cet endroit (Quénol et Beltrando, 2007). En condition advective, le secteur le plus froid est donc celui abrité par la haie (Figure 12, haut). Toutefois, une haie de porosité suffisante va favoriser l'uniformité des températures horizontalement (Figure 12, bas).

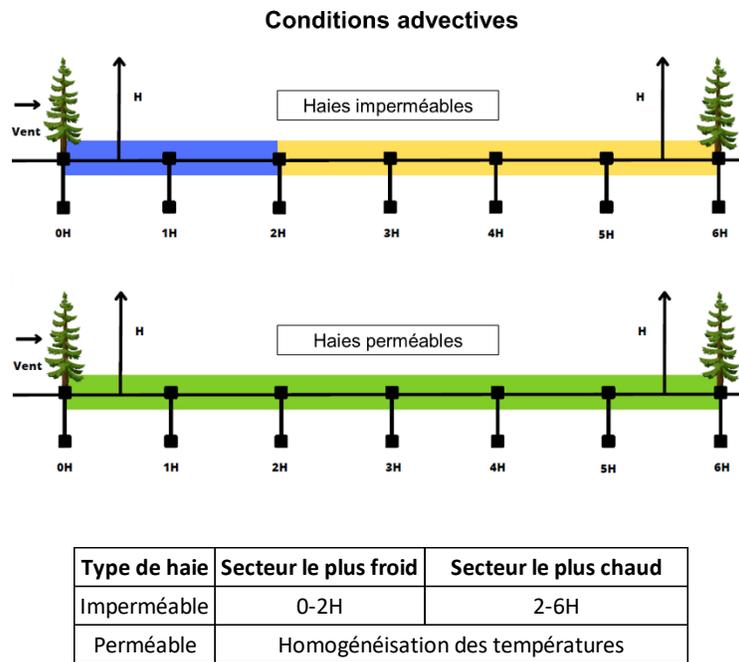


Figure 12. Schématisation de la variabilité spatiale des températures nocturnes en condition advective pour (en haut) des haies imperméables et (en bas) des haies perméables. Figure adaptée de Quénol et Beltrando (2007).

En bref, les brise-vent introduisent une hétérogénéité complexe sur le bilan radiatif. Leurs effets protecteurs dépendent des conditions (type de gel), des caractéristiques du brise-vent (hauteur, porosité) et du terrain (orientation du brise-vent et des autres obstacles par rapport à la topographie). Les brise-vent font partie des éléments à prendre en compte au niveau de l'aménagement de la ferme. Prévoir des sorties pour l'écoulement gravitaire des masses d'air froid doit être une préoccupation (voir section « Aménagement de la ferme » en 3.2.4.1.2).

Irrigation

Lors d'une irrigation durant un épisode de gel, de la chaleur latente est libérée par la formation de glace autour du fruit. Tant et aussi longtemps qu'il y a formation de glace, il y a libération de chaleur latente, et c'est ce mécanisme qui empêche le fruit de geler. Ce mécanisme est illustré à la Figure 13.



Figure 13. Schéma simplifié du principe physique lors de la formation de la glace, pour la méthode de protection de l'irrigation durant le gel.

Une irrigation contre le gel doit être maintenue jusqu'à ce que la glace soit fondue complètement. Si l'on cesse l'aspersion prématurément, le givre ou la glace, qui couvre les structures végétales, vont fondre en empruntant à celles-ci leur chaleur, et il en résulte un refroidissement qui peut causer des dégâts (OMAFRA, 2023a). Le design du système doit être adapté aux conditions d'opération qui dépendent grandement du vent et du froid attendu. La protection contre le gel par l'irrigation requiert de grands volumes d'eau.

La structure du plant doit être assez forte pour supporter le poids de la glace. Plus les fruits avancent en maturité et plus ils sont susceptibles à l'abscission, soit le processus physiologique naturel par lequel le fruit se détache de la tige.

L'irrigation est la méthode la plus efficace pour maintenir les températures près de 0 °C lors d'une forte gelée.

Le taux d'application dépend de la vitesse du vent. En condition advective, il faut prévoir un taux d'application plus élevé pour que la protection demeure efficace (OMAFRA, 2023b).

Irrigation du sol sec

Maintenir le sol plus humide avant un événement de gel, permet de maximiser la rétention de la chaleur absorbée durant la journée. Cela se base sur les propriétés physiques de l'eau. L'eau a une meilleure capacité à emmagasiner la chaleur et elle est une meilleure conductrice de chaleur que l'air présent dans un sol sec. De plus, quand l'eau se refroidit ou gèle, la température autour de l'eau s'élève au fur et à mesure que de la chaleur latente est libérée. Mouiller le sol peut aussi le rendre plus foncé, ce qui augmente l'absorption de la radiation solaire (Snyder et Melo-Abreu, 2005). Toutefois, dans un système cultural « pleine couverture » comme celui du bleuet, peu de sol est exposé. Il n'est pas nécessaire d'irriguer le sol en profondeur comme les transferts de chaleur se produisent dans les 30^{ers} cm de sol (Snyder et Melo-Abreu, 2005).

Toutefois, lorsque la surface est mouillée, l'évaporation de l'eau absorbe l'énergie calorifique et atténue le réchauffement (OMAFRA, 2023). Ce principe peut contrebalancer les bénéfices de l'absorption de chaleur décrits plus haut (Snyder et Melo-Abreu, 2005). Il est ainsi préférable d'humidifier le sol assez longtemps avant un événement de gel, pour que le soleil ait eu le temps de bien réchauffer le sol (Snyder et Melo-Abreu, 2005). Un autre bémol est que l'humidité peut aussi élever la température critique à partir de laquelle les végétaux subissent les méfaits du gel (OMAFRA, 2023).

La Figure 14 illustre les différents principes physiques décrits ci-dessus selon lesquels : 1) le sol humide a une meilleure capacité d'emmagasiner la chaleur dans le sol; 2) le refroidissement de l'eau durant le gel libère de la chaleur latente vers la culture ce qui a un effet réchauffant sur cette dernière; et 3) il y a des pertes de chaleur radiatives durant le gel et via l'évaporation de l'eau présente dans le système cultural, car l'eau utilise l'énergie eu milieu lors de l'évaporation.

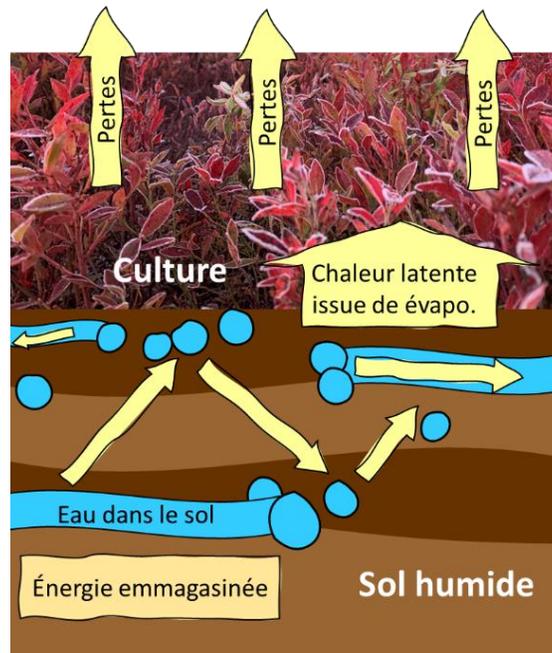


Figure 14. Schéma simplifié des échanges de chaleur durant le gel, pour la méthode de protection de l'irrigation avant le gel (irrigation du sol sec).

Bâche

Couvrir les plants avec une bâche est une méthode de protection passive. La bâche agit comme un isolant en interceptant la radiation émise par le sol, ce qui réduit la perte de chaleur par rayonnement. Ce principe est illustré par les flèches jaunes à la Figure 15. C'est un principe analogue à une nuit nuageuse ou à la méthode qui utilise la production de fumée qui est parfois utilisée dans les vignobles. La protection contre le gel dépend également de l'énergie radiative emmagasinée dans le sol. Un sol plus humide va favoriser l'emmagasinage de chaleur (voir section précédente « irrigation du sol sec ») et accroître l'efficacité de cette méthode (Snyder et Melo-Abreu, 2005).

Il est à noter qu'à la Figure 15, on aperçoit un piquet de bois qui supporte une sonde MX2201 et qui est coiffé d'un chapeau blanc en plastique. Ce chapeau a été ajouté pour permettre l'installation de la bâche sans qu'elle soit endommagée par le piquet. La surface de ce chapeau qui est orientée vers le ciel a été perforée pour permettre le mouvement de l'air.

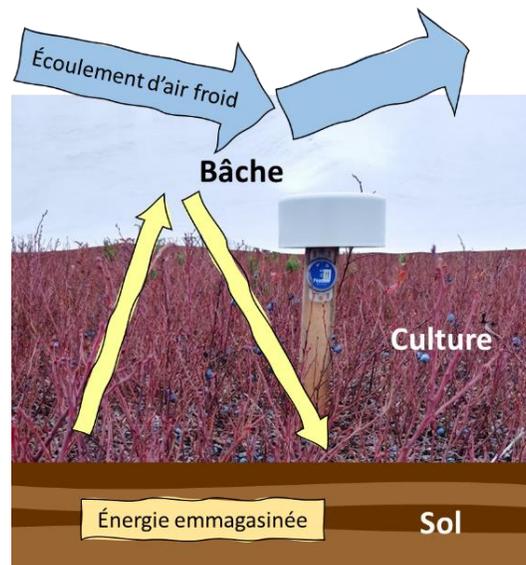


Figure 15. Schéma simplifié des échanges de chaleur pour la méthode de protection de la bâche.

La bâche protège aussi contre le gel advectif (vent froid). Toutefois, en condition advective (vent fort), l'efficacité de la bâche peut être diminuée, car elle peut se déplacer. De plus, le vent froid peut s'engouffrer sous la bâche, réduisant la quantité de chaleur emmagasinée dans le sol.

Les bâches sont généralement utilisées pour des cultures près du sol, mais peu d'études se sont attardées à cette méthode de protection pour le bleuet sauvage cultivé. Dans la pomme de terre, la protection par bâche de polypropylène non tissée a fourni une protection aux températures basses et elle a significativement réduit le dommage aux plants (Bhullar, 2012). De nombreuses études réalisées dans la pomme de terre ont d'ailleurs remarqué une augmentation de la température du sol qui pourrait varier selon le type de ce dernier et les conditions climatiques (ex. : Wadas, 2016 : Une revue sur le sujet). Le gain potentiel de température varie entre 2 à 3 °C à 10 cm de profondeur dans le sol et de 2 °C à la surface de celui-ci.

D'après les renseignements provenant de fournisseurs de bâches, les plus lourdes (50 à 70 g/m²) peuvent offrir une protection de 2 à 3 °C, mais cela varie en fonction du poids, ainsi que d'un fabricant à l'autre (OMAFRA, 2022). Les bâches plus légères (19 à 30 g/m²) fourniraient une protection de 1 à 2 °C (OMAFRA, 2022). Une étude de l'Université du Tennessee (OMAFRA, 2022) n'a montré qu'une protection de 1 °C, même avec des couvertures plus lourdes. Deux couches de bâche de 30 g/m² fourniraient plus de protection qu'une seule couche de matériel de 70 g/m².

L'irrigation peut s'ajouter aux bâches dans une méthode « combinée ». Cela se fait déjà dans la culture de la fraise (OMAFRA, 2022). Pour réussir cette méthode, il serait nécessaire de connaître la température de la partie sensible du plant sous la couverture pour débuter l'irrigation lorsqu'une température est atteinte (OMAFRA, 2022). L'irrigation additionnée aux bâches est très efficace et permet de protéger les cultures contre le gel dans de mauvaises conditions (OMAFRA, 2022).

Avis au lecteur : La méthode combinée « bâche + irrigation » n'a pas été testée dans le cadre de ce projet.

3.2.4.2 Consignes de déclenchement

Les consignes de déclenchement sont décrites ci-dessous pour chaque méthode. La détermination d'un risque de gel était basée sur la prévision de la température d'Environnement Canada pour Normandin (température de l'air à 2 m du sol). En 2020 et 2021, un seuil de 2 °C a été utilisé pour déployer une protection contre le gel. Ce seuil s'est avéré insuffisant pour certains endroits de la ferme, et ce, particulièrement dans les endroits les plus bas (zone C à la Figure 1). En 2022, le seuil pour déployer une méthode de protection était de 5 °C.

Machine à vent

Pour tous les épisodes, la machine a été déployée avec une consigne de température préprogrammée (déclenchement automatique). Étant donné que la sonde servant au déclenchement est située à 1,5 m, soit une hauteur qui est supérieure à celle des fruits qui sont à 20 cm, un décalage de température était attendu entre ces 2 emplacements. Le déclenchement de la machine a été programmé selon les consignes de températures suivantes :

- 2021, automne :
 - 3 °C (départ et arrêt)
- 2022, printemps:
 - 23 au 24 mai : 5 °C (départ), 6 °C (arrêt)
 - 31 mai : mode manuel à 16h00 (exceptionnellement)
 - 20 juin au 8 juillet : 10 °C (départ), 11 °C (arrêt). Température plus élevée, car il s'agissait de tests supplémentaires. Aucun risque de gel n'avait été anticipé d'après les prévisions météorologiques.
- 2022, automne:
 - Jusqu'au 15 sept. : 7,5°C (départ), 9,5 °C (arrêt)
 - 15 sept. à la fin : 7,5°C (départ), 8,5 °C (arrêt)

En 2022, une température d'arrêt plus élevée que celle de départ a été utilisée pour éviter des arrêts et des départs fréquents de la machine, situations qui ont été observées en 2021. Aussi en 2022, la consigne de départ a été fixée à une température plus élevée que celle de 2021, et ce, pour deux raisons : 1) il a été remarqué que la consigne de 3 °C était parfois insuffisante en 2021; et 2) la machine était installée sur un bouton. Il était donc attendu d'avoir un décalage entre la température à la hauteur des fruits (20 cm) et celle à la hauteur de la sonde de la machine (1,5 m).

La machine n'a pas été déployée à l'annonce de vents forts.

L'angle de la tête du ventilateur était incliné à 6° vers le sol (réglage par défaut de la machine n'ayant pas été modifiée). La flèche du ventilateur pivotait autour de la base sur 360° en rotation complète et au rythme de 15 rotations/heure (valeur réelle mesurée). Au printemps 2022, pour faire un test, c'est une rotation aller-retour de 180° qui a été utilisée.

Bâche

La bâche était déployée avant l'annonce du premier risque de gel et était laissée au sol en continu. En cas d'annonce de température supérieure à 20-25 °C pour quelques journées consécutives, la bâche devait être retirée afin d'éviter l'atteinte de températures trop hautes sous la bâche qui auraient pu affecter la qualité des fruits.

Brise-vent

Les sites instrumentés ont été sélectionnés de sorte qu'ils soient bordés de brise-vent matures avec une hauteur et une porosité uniforme.

Irrigation

L'irrigation a été déployée lorsqu'il y avait un risque de gel et devait demeurer active durant toute la durée du gel, et ce, jusqu'à la fonte complète de la glace.

Irrigation du sol sec

L'irrigation du « sol sec » devait se faire en journée (avant le coucher du soleil) et préférentiellement 12 h avant un avis de gel au sol lorsque le sol était à un statut hydrique plus sec que la capacité au champ.

3.2.5 Identifier et caractériser les risques avec l'approche SWOT modifiée

Des risques qui sont de nature technique, agronomique, économique et environnementale ont été identifiés. Afin de structurer la démarche, une analyse de type « SWOT modifiée » a été effectuée. Le SWOT se décline en quatre catégories:

- S : Force (*strengths*)
- W : Faiblesse (*weaknesses*)
- O : Opportunités (*opportunities*)
- T : Menaces (*threats*)

Des matrices SWOT ont ensuite été construites pour chaque méthode. Ces matrices ont ensuite permis de produire un outil visuel et comparatif des méthodes.

3.2.6 Déterminer les coûts pour l'adoption, selon la méthode

L'analyse économique a été réalisée par le Centre d'études sur les coûts de production en agriculture (CECPA, 2023). Cette analyse est disponible à l'Annexe 9 de ce rapport (p. 269).

3.2.7 Améliorer la compréhension des conditions météorologiques qui représentent un risque de gel

3.2.7.1 Récurrences climatiques des gels au Saguenay–Lac-Saint-Jean

L'analyse des récurrences climatiques des gels au niveau du couvert végétal visait à fournir les statistiques suivantes pour le mois de septembre, et au S.-L.-St-J. : 1) les statistiques sur les dates de premier gel; et 2) les statistiques sur les types de gels en présence lors de ces épisodes. Cette section présente la méthodologie utilisée pour y parvenir.

3.2.7.1.1 Définition du domaine d'analyse

Les conditions météorologiques sur l'ensemble du territoire du S.-L.-St-J. ont été analysées. Le domaine d'analyse est représenté par le territoire présenté à la Figure 16 et avec un périmètre est délimité par les coordonnées géographiques suivantes : 49.080°, -72.768°; 48.122°, -69,721°. Les points à la Figure 16 représentent les stations météorologiques de certains membres du Réseau Météorologique Coopératif du Québec (Lepage et Bourgeois, 2011) ayant des données météorologiques disponibles entre 1992-2022. Le territoire choisi permet de capturer un portrait global des bleuetières de la région du S.-L.-St-J. La Figure 17 présente la distribution des bleuetières pour la région du S.-L.-St-J.

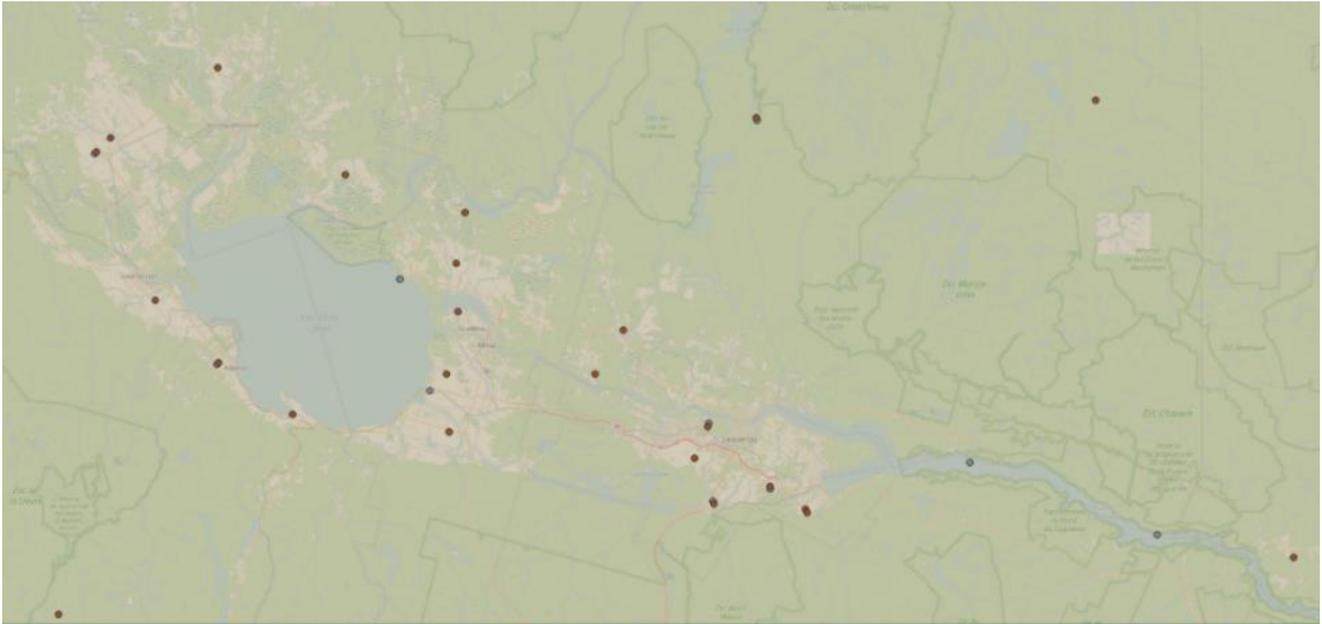


Figure 16. Périmètre utilisé pour les analyses agrométéorologiques (Google Maps). Les points représentent les stations météorologiques publiques ayant des données météorologiques 1992-2022.

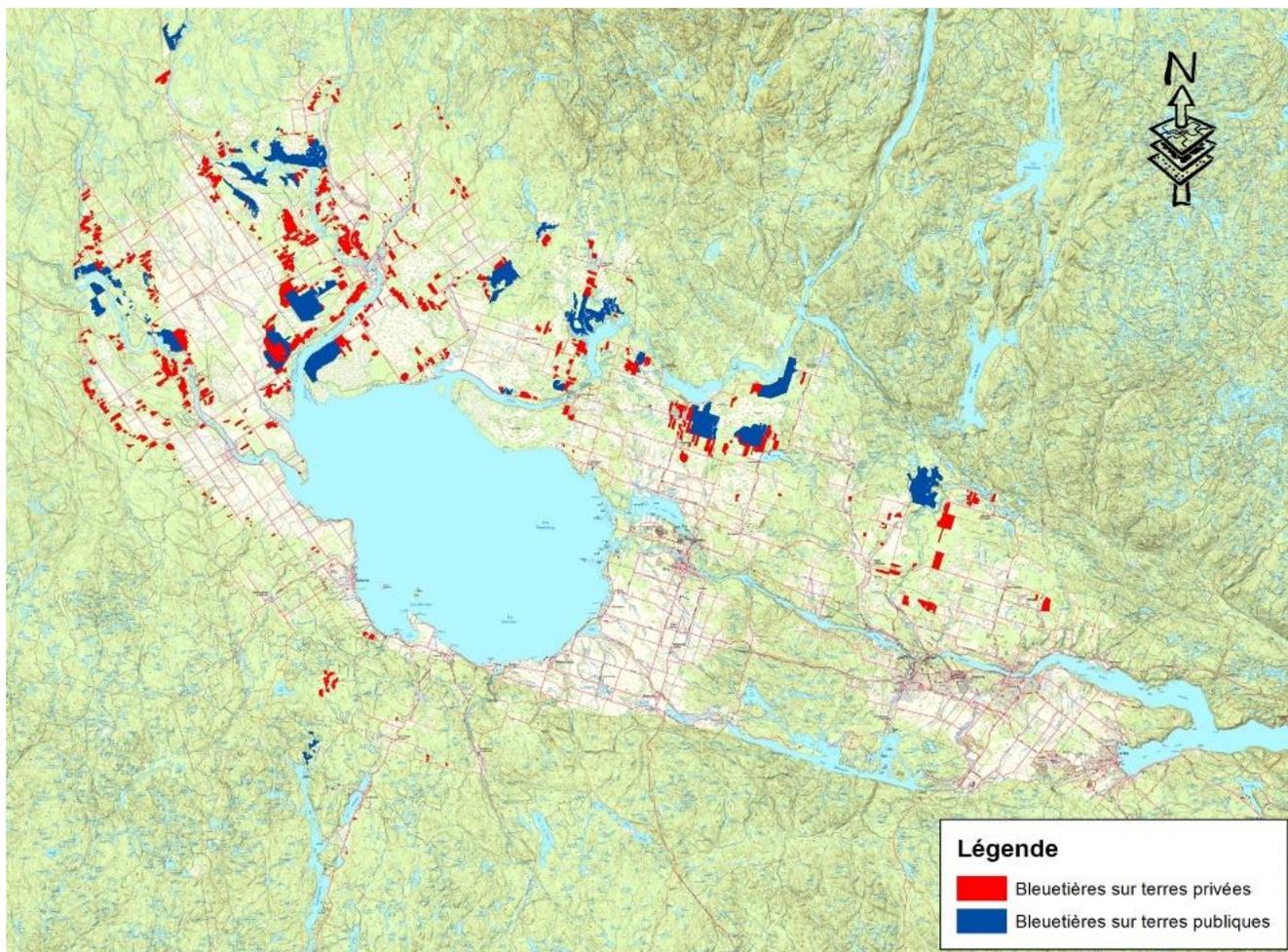


Figure 17. Distribution des bleuetières au S.-L.-St-J. (MAPAQ, 2023).

3.2.7.1.2 ERA5

Pour connaître les conditions météorologiques à l'intérieur du périmètre défini, des données météorologiques modélisées ont été utilisées. Ce type de données s'appelle une réanalyse et elle est produite à partir d'observations (stations, bateaux, radars, avions et satellites), de modèles de prévision numérique et de méthodes d'assimilation de données. Elle combine les observations et les modèles de prévision pour créer une analyse, un état initial de l'atmosphère. Les analyses sont typiquement utilisées pour des prévisions, mais elles peuvent aussi être produites pour étudier le passé. Dans un tel cas, ce sont des analyses rétrospectives, ou communément appelées, des réanalyses. Les réanalyses sont couramment utilisées pour les études météorologiques et climatiques (Peng, 2014). Le centre ECMWF (ECMWF 2021a), soit le « European Centre for Medium-Range Weather Forecasts », est reconnu pour produire des réanalyses de haute qualité, la plus récente étant celle de 4^e génération: ERA-Interim (Beck, 2017; Sun, 2018). En mars 2019, l'ECMWF a lancé la réanalyse de 5^e génération, ERA5 (ECMWF 2021b). Les données de ERA5 sont disponibles sur une base horaire et pour la période de 1981 jusqu'au mois précédent la date du jour.

Ces données ERA5 ont été utilisées pour analyser les conditions météorologiques autour de la région de du S.-L.-St-J. du mois de septembre 1992-2022. Une période de 30 ans a été choisie pour s'aligner avec la communauté climatique qui utilise typiquement cet intervalle. Les données ont une résolution spatiale de 0,1° x 0,1° (approximativement à 11 km x 7,3 km à 48,5° Nord, soit la latitude moyenne de la région du S.-L.-St-J). Les paramètres météorologiques qui ont été extraits sont : 1) la température du point de rosée à 2 m; 2) la vitesse et direction du vent à 10 m; et 3) la température de la surface (*skin temperature*). Cette dernière fait référence à toutes températures rayonnantes effectives à la surface « du sol, de l'eau et de la surface de la canopée » en combiné.

L'avantage d'utiliser la température de surface est qu'elle représente mieux la température au niveau des fruits (20 cm) que la température standard mesurée par les stations météo (2 m). Des données sur la couverture nuageuse (hauteur de la base des nuages et pourcentage du couvert nuageux) de ERA5 ont aussi été extraites. Leur résolution spatiale est plus grossière (environ 30 km).

Une importante mise en garde doit être émise au sujet des données utilisées. Étant donné que la température du point de rosée, la vitesse et la direction du vent et la hauteur des bleuetières ne sont pas disponibles, les analyses effectuées ne seront pas 100 % représentatives de ce qui est observé à cette hauteur. En raison du refroidissement thermique qui a lieu durant la nuit, la température à la hauteur des fruits (20 cm) est plus froide que la température à 2 m. Bien que cela vise à être corrigé en partie avec l'utilisation de la « température de la surface », l'utilisation des autres paramètres météorologiques de la station augmente les risques de sous-estimer le nombre d'épisodes de gels. Les vents à 10 m du sol de ERA5 vont aussi avoir tendance à être généralement plus forts et plus stables qu'au niveau des champs, où l'effet de la turbulence est présent. Vu les contraintes sur les données disponibles, la « température de surface » a été couplée avec des données de température de point de rosée à 2 m et des données de vitesse du vent à 10 m.

Une seconde mise en garde concerne la validité des réanalyses. Bien que ces produits soient régulièrement utilisés et documentés dans la communauté météorologique, il n'existe pas d'analyses d'ERA5 au-dessus du S.-L.-St-J. pour les épisodes de gel. Ainsi, il est impossible de savoir si, par exemple, la température du modèle est supérieure ou inférieure à ce qu'elle devrait donner réellement (la donnée réelle correspond à la mesure d'une station météorologique). Pour déterminer la précision et l'exactitude des données, une comparaison doit être faite avec toutes les données de stations météorologiques disponibles sur le périmètre défini.

3.2.7.1.3 Stations météorologiques

Des stations météorologiques réparties autour du S.-L.-St-J. ont été utilisées pour valider la précision et l'exactitude des données des réanalyses ERA5. Cela impliquait d'aller interroger les bases de données de stations météorologiques mentionnées précédemment pour connaître leurs positionnements géographiques et leurs données. Les stations météorologiques utilisées sont présentées à l'Annexe 2 (Tableau 13).

3.2.7.1.4 Analyse agrométéorologique

L'efficacité des méthodes de protection varie selon le type de gel en place (Barriault et Gosselin, 2014) (Figure 7). Les types de gel ont été caractérisés en utilisant les données de ERA5 en « entrée », pour ensuite produire une analyse climatique des types de gel à l'échelle du S.-L.-St-J.

Un épisode de gel peut durer plusieurs heures, mais pour garder l'analyse simple et rester plus près de ce qui crée des dommages aux fruits, seule l'heure de la nuit où la température minimale de l'air a été atteinte a été conservée. La température minimale de la nuit est souvent atteinte juste avant le lever du soleil, mais certaines conditions, comme le passage d'un front chaud ou l'arrivée d'un couvert nuageux, peuvent décaler ce moment.

La durée de la nuit a été délimitée entre le moment où le soleil se couche et où il se lève. La librairie Python (Kennedy, 2022) basée sur une liste de calculs produite par l'agence fédérale américaine pour la météorologie (NOAA, 2022) a été utilisée pour définir ces moments.

Le langage Python a été utilisé pour les analyses.

3.2.7.2 Cartes d'interpolations spatiales

Afin d'apprécier visuellement l'uniformité de la protection des différentes méthodes de protection contre le gel, des cartes thermiques ont été produites. Les données des sondes de températures MX2201 (Onset) géoréférencées ont été utilisées (emplacements présentés à l'Annexe 8, de la Figure 54 à la Figure 69).

Une interpolation spatiale « pondération inverse à la distance » a été appliquée. Cette technique couramment utilisée dans le domaine de la météorologie (Abatzoglou, 2013) se démarque par sa facilité d'application et sa rapidité d'exécution (Babak et Deutsch, 2009). Elle a cependant l'inconvénient de produire des anneaux concentriques autour du point de départ (Golden Software, 2022).

Le logiciel R (R Core team, 2022) a été utilisé. L'interpolation inverse pondérée a été produite à l'aide du *package* *gstat* (v2.1-0; Pebesma, 2004), l'acquisition des données satellitaires de Google avec le *package* *ggmap* (v3.0.1; Kahle et Wickham, 2013), et la production des cartes avec le *package* *ggplot2* (v3.4.0; Wickham, 2016).

Les cartes thermiques ont été produites pour toutes les dates où la machine à vent et l'irrigation ont été déployées.

- Septembre 2020 (2 épisodes) : 14 au 15 et 20 au 21.
- Octobre 2021 (4 épisodes) : 3 au 4, 4 au 5, 5 au 6, et 22 au 23.
- Septembre 2022 (5 épisodes) : 4 au 5, 5 au 6, 16 au 17, 18 au 19, et 19 au 20.

Comme l'efficacité de la machine est influencée par la pente (Wilson, 2001) et le vent (Ribeiro, 2006; Heusinkveld et coll.), ces deux paramètres sont aussi présentés avec les cartes thermiques pour permettre une analyse visuelle qualitative. Pour chaque site, une carte topographique (Info-Sols, 2023), ainsi que le vent sont représentés. L'orientation du vent est présentée par une rose des vents. Cette rose des vents renseigne également sur la vitesse du vent par palier, c'est-à-dire si le vent se retrouve au-dessus ou au-dessous du seuil de 8 km/h (qui est le seuil de vent pour le gel advectif ou radiatif, Figure 7).

3.2.7.3 Analyses statistiques de la température au niveau des fruits

Pour tester l'efficacité des différentes méthodes de protection du bleuet contre le gel, l'effet des méthodes de protections sur la température a été analysé statistiquement (résultats à la section « 4.1.5.2.1 »). Les mesures de températures à la hauteur des fruits ont été converties des façons suivantes:

- Températures moyennes durant la nuit.
- Températures minimales durant la nuit.
- Degrés-heures de gel sous -2 °C ($DH_{-2\text{°C}}$) : Représente la somme des degrés-heures inférieure à -2 °C durant la nuit.

Par exemple : Pour un gel d'une durée de 2 h à -5 °C , les $DH_{-2\text{°C}}$ sont de $-6\text{ °C}\cdot\text{h}$

Car

le nombre de degrés sous la limite de -2°C pour chaque heure est : $-5\text{ °C} - (-2\text{ °C}) = -3\text{°C}$

Alors

pour 2 heures : $-3\text{ °C} \times 2\text{ h} = -6\text{ °C}\cdot\text{h}$

Pourquoi utiliser un nouvel indice de type degrés-heure de gel? Il existe peu de littérature sur le seuil de tolérance au gel des fruits du bleuet sauvage cultivé quant à la durée et à l'intensité du gel tolérables. Le seuil de $-2,2\text{ °C}$ a été identifié comme un seuil critique pour le gel en bleuetière (Desjardins, 2014), mais très peu d'études se sont attardées à la résistance au gel des fruits. Dans d'autres cultures, ce type de relation entre la fermeté et les facteurs d'intensité et de durée du gel existe, mais elles ne sont pas transférables au bleuet sauvage cultivé (ex. : Baranyay et Smith, 1974). L'indice degrés-heures combine à la fois l'intensité et la durée du gel.

Deux approches d'analyse ont été utilisées et le choix de celles-ci dépend du type de données récoltées et du mode de déploiement des méthodes utilisées:

- Méthodes de protection avec données ponctuelles :
 - Irrigation
 - Machine à vent
 - Irrigation du sol sec
- Méthodes de protection avec données « en continues » :
 - Bâches (19 et 38 g/m^2)
 - Brise-vent

Pour chaque méthode, l'effet du traitement a été estimé sur trois aspects de la température décrits ci-dessus.

Déploiement ponctuel

Les méthodes de protections ponctuelles sont déclenchées seulement lorsqu'un gel est prévu durant la nuit. L'effet de ces méthodes de protection n'étant effectif que durant la protection, ce sont uniquement les nuits durant lesquelles la méthode a été déployée qui sont analysées.

Les variables de température ont été modélisées avec des modèles linéaires généralisés mixtes (GLMM) quand le traitement était catégorique (irrigation: témoin/protégé, sol sec: témoin/protégé). Des modèles additifs généralisés mixtes (GAMM) tels qu'implémentés dans la librairie R *mgcv* (Wood, 2017) ont été utilisés quand le traitement était en continu (distance à la machine à vent). Pour la machine à vent, l'effet de la distance est modélisé de façon non linéaire avec une méthode de lissage (*Smoothing Splines*), ce qui donne à la courbe modélisée une forme à la fois flexible et parcimonieuse qui se conforme aux données. Une contrainte a été ajoutée pour que le gradient distance soit monotonique (l'effet va toujours dans la même direction, seulement l'amplitude change avec la distance). La contrainte a été implémentée avec la librairie R *scam* (Pya et coll., 2015).

Dans tous les cas, la position de la sonde de température (MX2201, Onset) et la date ont été incluses comme effets aléatoires pour modéliser les variances entre les MX et les dates. Lorsque nécessaire, la variance a été modélisée par traitement pour pallier les variances hétérogènes.

La validité de chaque modèle a été vérifiée en examinant les résidus (observé - estimé).

Déploiement en continu

Les méthodes de protection en continu sont « permanentes » durant la saison, ce sont alors l'ensemble des données qui ont été utilisées.

Les variables de température ont été modélisées avec des modèles additifs généralisés mixtes (GAMM). Les modèles décrivent la variation de température dans le temps par lissage (*Smoothing splines*) et la différence entre les traitements. Quand le traitement est catégorique (bâche: témoin/protégé ou témoin/bord/milieu) un facteur fixe est ajouté au modèle. Quand le traitement est continu (distance au brise-vent) l'effet est modélisé comme un gradient par lissage, ce qui permet une relation non linéaire à la fois flexible et parcimonieuse.

La position de la sonde de température (MX2201, Onset) a été incluse comme effet aléatoire pour modéliser la variabilité entre les points de mesures. Lorsque nécessaire, cet effet a été niché dans le traitement pour pallier les variances hétérogènes. À noter que la date n'est pas incluse comme effet aléatoire puisqu'elle est déjà modélisée en continu.

Pour ces méthodes, les degrés-heures de gel pour plusieurs jours ont été obtenus, ce qui a permis de modéliser l'accumulation de ces degrés-heures au courant de la saison. Pour cet aspect, une contrainte a été ajoutée au modèle pour que les degrés-heures ne puissent que s'accumuler (afin de ne pas perdre de degrés-heures).

3.2.7.4 Analyses statistiques de la fermeté des fruits

Une analyse statistique a été menée pour prévoir comment la méthode de protection affecte la fermeté dans le temps (résultats à la section « 4.1.5.2.2»). La fermeté des bleuets a été modélisée avec des modèles additifs généralisés (GAM). Cela a permis de modéliser des relations non linéaires de façon flexible et robuste. Des contraintes aux relations ont été ajoutées pour obtenir des résultats réalistes (ex. : la fermeté ne peut pas augmenter pour la période modélisée). La validité de chaque modèle a été vérifiée en examinant les résidus (observé - estimé).

IL est supposé que la fermeté des bleuets devrait s'approcher de zéro tard dans la saison, avec une fréquence et une intensité de gels croissants. Même si des données si tardives n'étaient pas disponibles, l'existence d'une limite au maintien de la fermeté est claire, même avec les méthodes de protections employées. Le modèle a donc été forcé à une fermeté ≈ 0 (g/3 mm) à la date du 1^{er} décembre. Des valeurs aléatoires de fermeté – intervalle [10, 20] g/3 mm – pour cette date ont été ajoutées aux données d'entrée.

3.2.7.5 Relation entre la fermeté et les degrés-heure de gel

La relation entre l'accumulation de gel (en degrés heures sous -2 °C, soit $DH_{-2^{\circ}C}$) et la fermeté des bleuets a été explorée (résultats à la section « 4.1.5.2.4»). Comme la fermeté est un critère de qualité important pour la récolte du bleuet pour le marché frais, elle peut servir de critère pour évaluer l'efficacité d'une méthode de protection.

Dans toutes les analyses, une approche par comparaisons de modèles statistiques a été utilisée afin d'identifier les facteurs qui ont un effet sur la variable réponse (ex. degrés-heures, fermeté). Pour déterminer si un facteur avait un effet, des modèles statistiques qui incluent ou non le facteur ont été comparés avec le critère d'information AIC (Akaike, 1974). Si le AIC du modèle qui inclut le facteur en question est plus bas (d'au moins 2), on conclut qu'il y a un effet. L'AIC est un indice d'information inexplicé (similaire à la variance résiduelle). Le modèle dont les valeurs estimées correspondent le mieux aux valeurs mesurées a donc un AIC plus bas. L'AIC inclut cependant une pénalité proportionnelle à la complexité du modèle pour éviter les résultats fortuits. Un modèle trop compliqué peut donc avoir

un AIC plus élevé même si les estimations correspondent mieux aux valeurs mesurées. À noter que les effets aléatoires sont inclus dans tous les modèles évalués parce qu'ils représentent la structure connue de l'échantillonnage. Cela évite aussi la pseudo-réplication puisque la corrélation entre les observations d'une même sonde ou d'une même date est prise en compte.

Le logiciel R (R Core team, 2022) a été utilisé pour toutes les analyses statistiques.

3.2.7.6 Outils visuels et conditions moyennes

Différents outils visuels et synthèses sur les moyennes des températures (à la hauteur des fruits) et sur les conditions météorologiques en places lors des nuits de gel ont été produits (section 4.1.1.2). Pour chaque méthode et épisode (de gel ou de déploiement) :

- Conditions météo de stations *in situ*.
- Profil vertical des températures (0,2 à 9 m).
- Températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits en zone protégée et non protégée.
- Tableaux synthèses des conditions moyennes météorologiques et types de gels rencontrés.
- Cartes spatiales des températures de l'air à la hauteur des fruits.

Couvert nuageux

Les données de couverture nuageuses sont issues de réanalyses extraites en données « horaires » et issues d'ERA5 (Hersbach et coll., 2020). Afin de caractériser objectivement l'état clair ou nuageux du ciel, les critères de choix fixés sont représentés au Tableau 3. Ces critères de choix se basent sur les études de Viúdez-Mora et coll. (2015) et tel que décrit dans Anderson et coll. (2022). Bien que l'état nuageux du ciel se caractérise en réalité avec des variables continues, l'établissement de ces critères permet un choix objectif sur l'état nuageux du ciel et une utilisation systématique de la clé diagnostique des types de gels (Figure 7).

Tableau 3. Diagramme de flux pour le choix du type de ciel.

Couvert nuageux	Base des nuages		Ciel
< 25 %		→	Clair
> 25 %	< 5 km	→	Couvert
> 25 %	> 5 km	→	Clair

3.3 Activités de diffusion

- Automne 2020
 - Présentation du projet sur le site Internet de l'IRDA
 - <https://www.irda.qc.ca/fr/projets-recherche/protection-gel-bleuet/>
- 24 février 2022
 - Conférence « Efficacité des méthodes de protection contre le gel des fruits dans la culture du bleuet sauvage ». Les Webinaires horticoles du MAPAQ « Protection contre le gel ».
- 8 mars 2022
 - Présentation des résultats préliminaires aux collaborateurs (8 participants).
- 18 mars 2022
 - Mise en ligne du Webinaire sur YouTube
 - <https://www.youtube.com/watch?v=trduBH6ZnV8>
- 20 septembre 2022
 - Journée de démonstration à la ferme (50 participants).
 - Figure 156 (Annexe 7)
- 7 octobre 2022
 - Fiche synthèse de la journée de démonstration. Envoyé aux participants et publication sur la page Facebook du SPBQ (35 participants).
 - Figure 157 (Annexe 7)
- Décembre 2023
 - Rapport final (ci-présent)
 - Synthèse du projet (Boivin et coll., 2023)
- Automne 2023
 - Un balado portant exclusivement sur ce projet a été produit et est disponible en ligne sur « (EAU)trement dit » au nom de « Bleuet gel ».
 - <https://eautrementdit.buzzsprout.com/>

Mentions du projet lors d'autres présentations par l'équipe :

- Les Journées horticoles et grandes cultures 2022 - Saint-Rémi - Faits saillants d'une partie du Québec agricole irrigué.

4 Atteintes des objectifs

4.1.1 Mettre à l'essai des méthodes passives et actives de protection des fruits contre le gel qui sont adaptées au contexte de production du bleuet sauvage cultivé.

4.1.1.1 Dates des déploiements : réussites et échecs

Les « Épisodes » présentés au Tableau 4 correspondent aux nuits, selon l'année, où la température minimale moyenne (non-protégées) est descendue sous 0 °C, hormis pour ceux identifiés par un «*». Pour chacun de ces épisodes, il est indiqué si la méthode de protection était en fonction ou non. Ces dernières sont regroupées selon la catégorie à laquelle elles appartiennent (active ou passive). Il y a eu des ratées durant les deux premières années. Pour l'irrigation, il s'agit de problèmes de pression dus au colmatage du filtre et à d'importantes fuites, conséquentes à la déconnexion de gicleurs. En ce qui a trait à la bâche 19 g/m², il s'agit de déchirures. Dans tous les cas, la moyenne des températures atteintes lors des déploiements avec problèmes techniques est présentée à l'Annexe 5, afin de représenter l'effet qu'un déploiement raté peut avoir sur la protection contre le gel.

Tableau 4. Dates où les méthodes de protection contre le gel ont été en fonction à l'automne selon l'année, l'épisode et la méthode de protection.

Année	Épisode	Méthodes actives				Méthodes passives	
		Irrigation	Bâche 19g/m ^{2,3}	Bâche 38g/m ^{2,3}	Machine à vent	Haie brise-vent ⁵	Irrigation sol sec ⁶
2020	6 au 7 sept.				Profil temp. ⁴		
	10 au 11 sept.	Partielle ¹ Ø			Profil temp. ⁴		
	11 au 12 sept.				Profil temp. ⁴	Instrumentation	
	14 au 15 sept.				Profil temp. ⁴		
	16 au 17 sept.				Profil temp. ⁴		
	17 au 18 sept.	Partielle ¹ Ø			Profil temp. ⁴		
	18 au 19 sept.	Partielle ¹ Ø			Profil temp. ⁴		Irrigation ²
	19 au 20 sept.	Partielle ¹ Ø			Profil temp. ⁴		
	20 au 21 sept.				Profil temp. ⁴		
	21 au 22 sept.				Profil temp. ⁴		
	24 au 25 sept.				Profil temp. ⁴		
	25 au 26 sept.				Profil temp. ⁴		
	Total	6/12	11/12	-	0/12 ⁴	10/12	6/12
2021	27 au 28 août						
	18 au 19 sept.						
	19 au 20 sept.						
	1 au 2 oct.						
	2 au 3 oct.						
	3 au 4 oct.				Partielle ¹		
	4 au 5 oct.						
	5 au 6 oct.						Irrigation ²
	6 au 7 oct.						
	8 au 9 oct.						
22 au 23 oct.		Partielle ¹ Ø					
23 au 24 oct.		Partielle ¹ Ø					
	Total	4/12	6/12	6/12	4/12	12/12	5/12
2022	26 au 27 août						
	1 au 2 sept.						
	4 au 5 sept.						
	5 au 6 sept.						
	* 6 au 7 sept.			*	*	*	
	16 au 17 sept.						
	17 au 18 sept.						
	18 au 19 sept.						
	19 au 20 sept.	Ø					
	* 22 au 23 sept.	*			Partielle ¹	*	* Irrigation ²
	23 au 24 sept.						
	24 au 25 sept.						
	* 28 au 29 sept.	* Partielle ¹		*		*	*
	29 au 30 sept.						
	1 au 2 oct.						
	2 au 3 oct.						
3 au 4 oct.							
7 au 8 oct.							
8 au 9 oct.							
	Total	8/19	-	18/19	9/19	19/19	10/19

En fonction ■ Non en fonction ■

¹ Protection partielle liée à un problème technique.

² Une irrigation a eu lieu pour ramener le sol à la capacité au champ.

³ La méthode « bâche, était en fonction pour les périodes suivantes :

- En 2020, du 10 sept. au 1^{er} oct. (bâche 19 g/m²).

- En 2021, du 4 oct. au 10 oct. pour la bâche 19 g/m² (déchirée par le vent après cette date) et du 4 oct. au 26 oct. pour la 38 g/m² (2 x 19 g/m²).

- En 2022, du 1^{er} sept. au 7 sept. et du 15 sept. au 10 oct. (retirée durant une période chaude).

⁴ La machine à vent a été reçue au printemps 2021, toutefois, le profil de température (0,2 à 9 m) a été mesuré à l'automne 2020.

⁵ La méthode « brise-vent » était en fonction sans interruption jusqu'au démantèlement (dernière date présentée).

⁶ La méthode « irrigation sol sec » était en fonction sans interruption de l'irrigation présentée au démantèlement (dernière date présentée).

* Méthode en fonction, mais aucun gel mesuré en zone non protégée.

Ø Épisode non retenu pour l'analyse statistique, en raison du problème technique majeur affectant la protection lors d'un déploiement ou d'une tentative de déploiement.

Le Tableau 5 présente sept épisodes où la machine à vent a été déployée au printemps 2022. Des gels ont été enregistrés pour trois de ces sept épisodes.

Tableau 5. Dates où la machine à vent a été en fonction au printemps 2022.

Année	Épisode	Méthodes actives			Méthodes passives	
		Irrigation	Bâche	Machine à vent	Haie brise-vent	Irrigation sol sec
2022	23 au 24 mai					
	24 au 25 mai					
	31 au 1 juin					
	20 au 21 juin			*		
	23 au 24 juin			*		
	6 au 7 juil.			*		
	8 au 9 juil.			*		
	Total	0/7	0/7	7/7	0/7	0/7

En fonction

 Non en fonction

* Méthode en fonction, mais aucun gel mesuré en zone non protégée.

4.1.1.2 Suivi des conditions moyennes atteintes

Plusieurs outils visuels ont été produits à partir des données recueillies sur le terrain (conditions météo, profil vertical des températures, températures moyennes et cartes spatiales de la température de l'air à la hauteur des fruits). Bien qu'une analyse statistique (en 4.1.5.2.1 et 4.1.5.2.2) et une synthèse sur les moyennes aient été faites (en 4.1.1.2), l'ensemble des épisodes par méthode, pour chaque gel et/ou déploiement, est présenté en annexe :

- Graphiques des conditions météo Annexe 3 (p. 107)
- Profils verticaux des températures Annexe 4 (p. 123)
 - Machine à vent
- Graphiques des températures à la hauteur des fruits Annexe 5 (p. 132)
 - Machine à vent
 - Bâche
 - Brise-vent
 - Irrigation
- Cartes d'interpolation spatiales (6 dates choisies) Annexe 8 (p. 195)

4.1.2 Identifier et détailler les risques économiques, agronomiques et environnementaux conséquents à l'adoption de chacune des méthodes à l'étude.

Le Tableau 6 de la page suivante présente un comparatif et une synthèse des principaux éléments à considérer en lien avec les méthodes de protection contre le gel.

Tableau 6. Tableau comparatif des méthodes selon les éléments considérés pour la production de bleuets sauvages cultivés.

Section (rapport)	Éléments considérés	Bâche	Brise-vent	Irrigation	Machine à vent
	Règlementation	Aucune (À notre connaissance) ■	Possible ◆	Probable (Autorisation prélèvement) ◆	Aucune (À notre connaissance) ■
	Autre condition préalable	Aucune (À notre connaissance) ■	Aucune (À notre connaissance) ■	Approvisionnement en eau suffisant ◆	Aucune (À notre connaissance) ■
	Fournisseurs (N^{bre})	Moyen ◆	Plusieurs ■	Plusieurs ■	Peu ●
	Service après-vente (QC)	Oui ■	s.o.	Oui ■	Non ◆
3.2.3	Énergie (Fonctionnement)	s.o.	s.o.	Pompe diesel/électrique	Diesel
3.2.3	Mise en place	Exigeante (Main-d'œuvre) ●	1 fois, long terme ■	Moy. exigeante/Système enfoui possible ◆	Simple ■
3.2.3	Opération	Manuelle/Semi mécanisée ◆	s.o.	Manuelle, automatisation possible ◆	Automatisée ■
3.2.3 4.1.1	Entretien	Réparation déchirures ◆	Taille ◆	Colmatage filtre, étanchéité système ◆	Mécanique ◆
4.1.3 (CECPA)	Coût d'investissement (\$/10 ha)	95 075 ■	Non évalué	189 410 ◆	215 000 ◆
4.1.3	Durée de vie (Ans)	3 ◆	Élevé ■	15 ■	12 ■
4.1.3	Coût total/ha	2918	Non évalué	2681	3114
4.1.3	Seuil de rentabilité (kg fruits supplémentaires)	10 878	Non évalué	10 075	10 570
4.1.3	Probabilité d'atteindre seuil rentabilité	Faible ◆	Non évaluée ●	Élevé (En absence de défectuosité) ■	Faible ●
	Risque phytosanitaire	Non observé (Envisageable) ◆	Refuge insectes ■ ◆	Non observé (Envisageable) ◆	Assèchement feuillage ■
3.2.2	Perte superficies récoltables/cultivables	Ancrage avec sacs de sable ◆	Oui ◆	Tuyaux en surface ◆	Minime ■
3.2.2	Gêne opérations culturales/récolte	Oui ●	Non ■	Tuyaux en surface ◆	Impact minime ■
	Impacts système cultural envisageables	M-H, insectes, champignons ◆		Asphyxie racine, lessivage N ◆	Aucune (À notre connaissance) ■
	Risque sanitaire	Non évalué (Envisageable) ◆	Aucune (À notre connaissance) ■	Non évalué (Envisageable) ◆	Aucune (À notre connaissance) ■
	Nuisance sonore	Aucune ■	Aucune, effet protecteur ■	Possible (Pompe diesel) ◆	Oui ●
	Biodiversité	Non évalué	Non évalué (Envisageable)	Non évalué	Non évalué

Tableau 6 (suite)

Section (rapport)	Éléments considérés	Bâche	Brise-vent	Irrigation	Machine à vent
4.1.5 Annexe 8	Portée	Dimension bâche	10 ^{ers} m (Arbres matures)	Design du système	1-3 ha, patron circulaire variable
3.2.3 4.1.5	Facteur affecte portée	Déchirures	Direction du vent	Vent (Dérive)	Pente, direction vent, vitesse vent, brise-vent
	Surveillance (Opération/épisode gel)	Minimale	Aucune	Élevée	Vent
3.2.3	Surveillance (Hors période gel)	Vent et chaleur	Aucune	Minimale	Réservoir diesel/batterie démarrage
4.1.5	Gain possible température	Environ 2 °C	1,5 à 2 °C	Maintient près de 0 °C	10 à 50 % de l'inversion de temp., moy. 3 °C
Facteurs qui augmentent l'efficacité :					
4.1.5.1	Type de gel	Radiatif		Tous	Radiatif
4.1.5.3 Annexe 8	Topographie terrain		Gel radiatif et pente (risque accumulation air froid)		Plat (Favorable radiatif), Pente (Portée)
3.2.4 Annexe 3	Condition diurne précédente	Ensoleillée			Ensoleillée
3.3.3.1.2	Autres	Minimum 38 g/m ²			
Facteurs qui diminuent l'efficacité :					
3.2.4 4.1.5.1	Type de gel	Advection	Advection (selon direction vent et perméabilité haie)		Advection
3.2.4 Annexe 3	Condition diurne				
4.1.5.1	Vent	Vent > 5-6 km/h	Vent > 5 km/h		Vent > 4 km/h, direction affecte patron
	Autres éléments à considérer :	Gestion des déchets (Post vie utile)			
	Autres usages possibles :	Hâtivité printemps	Protection contre le vent Refuge oiseaux Diminution érosion éolienne Protection pollinisateurs Limite dérive pesticides	Protection contre stress hydrique	Refroidissement culture/cheptel

4.1.3 Déterminer les coûts pour l'adoption, selon la méthode

Les résultats de l'analyse économique, faite par le Centre d'études sur les coûts de production en agriculture (CECPA, 2023), sont annexés à ce rapport (Annexe 9, p.269).

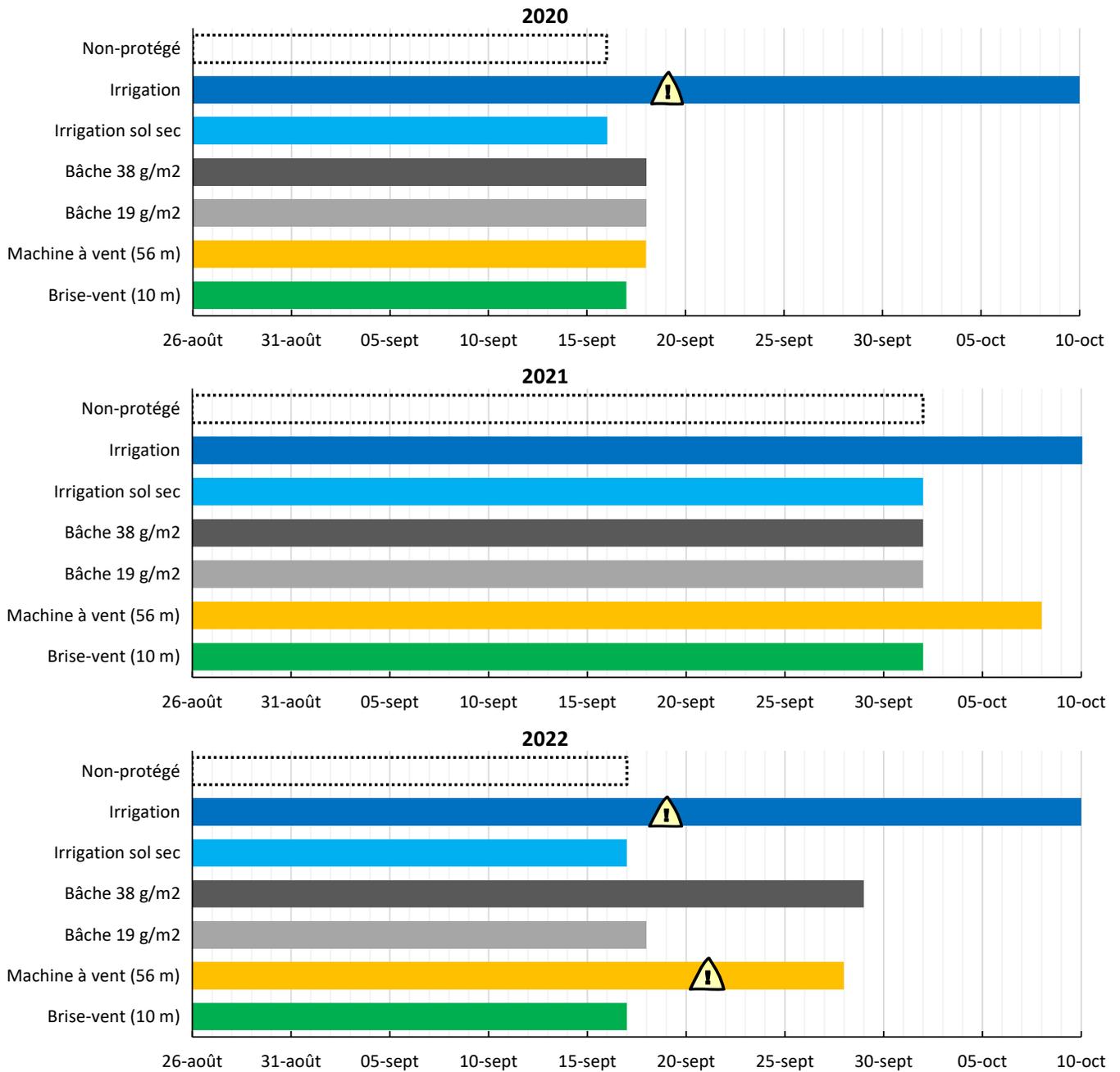
4.1.4 Quantifier l'impact de l'adoption de cette pratique sur la diminution du risque de gel précoce lors de la période de récolte souhaitée.

Avec les conditions météo des trois années d'essais (2020 à 2023), les dates jusqu'auxquelles les différentes méthodes de protections auraient permis de préserver la qualité du rendement ont été estimées (Figure 18). Pour cette évaluation l'atteinte d'une température inférieure à $-2,2\text{ °C}$ a été considérée comme un échec de protection. La Figure 18 montre également les défaillances techniques majeures rencontrées sur le terrain (triangle avec point d'exclamation), qui en contexte de production réelle, auraient mené à une perte de récolte. Les données sont montrées jusqu'au 10 octobre, même si cette date dépasse l'objectif de protection jusqu'au 1^{er} octobre. Cela permet de visualiser les premiers gels tardifs de l'automne 2021.

Pour la période 2020 à 2023, l'irrigation a été la méthode de protection qui a permis de maintenir les températures au-dessus du seuil de protection ($> -2,2\text{ °C}$) pour toute la saison. La méthode de protection par « irrigation du sol sec » n'est pas différente du témoin « non-protégé ». Seulement en 2020, le brise-vent aurait permis de gagner une seule journée par rapport à une zone « non-protégé ». Pour 2021 et 2022, le brise-vent n'est pas plus performant qu'une zone « non-protégé ». Pour les bâches de 2020 et 2021, la date maximale de protection n'est pas très différente du témoin. Cela est dû à la faible protection offerte par la bâche (entre 1 et 2 °C), combiné aux gels intenses du 19 septembre 2020 (env. -8 °C) et du 3 septembre 2021 (env. -5 °C). En 2022, la bâche de 38 g/m^2 aurait permis de prolonger la récolte jusqu'au 29 septembre. La machine à vent offre une protection variable, qui dépend de l'inversion de température présente (gel radiatif). La durée de protection que la machine aurait pu apporter de 2020 à 2023 est comparable à celle de la bâche 38 g/m^2 .

Les saisons 2020 et 2021 ont d'abord été caractérisées par des gels de forte intensité ($< -5\text{ °C}$) qui ont été suivis par des épisodes de plus faible intensité (comme c'est le cas en 2022). Cette distribution temporelle complique la comparaison de la performance relative entre des méthodes. Par conséquent, les méthodes de protections « moyennement performantes » (pas performante sous env. -5 °C) sont éliminées rapidement (Figure 15).

Finalement, sur la base du critère de maintenir la température au-dessus de $-2,2\text{ °C}$ de 2020 à 2022, l'irrigation aurait en moyenne permis de prolonger le plus la saison de récolte pour le marché frais. Au deuxième rang viennent la bâche de 38 g/m^2 et la machine à vent. La bâche 19 g/m^2 , le brise-vent et l'irrigation du sol sec atteignent la dernière place. Le brise-vent est la moins pire des méthodes « perdantes » en ayant offert un jour de plus de récolte sur une des trois années (2020). Il faut aussi noter qu'un risque plus élevé de défaillance (donc de perte de rendement) est associé aux méthodes de la machine à vent et de l'irrigation durant le gel, tel que vécu lors des expériences terrain de 2020 à 2023.



⚠ Date de défaillance majeure réellement observée sur le terrain. En contexte réel de production, ces défaillances auraient mené à un échec de la protection causant des pertes de rendement.

Figure 18. Durée de protection, 2020 à 2023, en considérant un déploiement hypothétiquement « parfait » des méthodes de protection (c'est-à-dire sans bris mécanique).

4.1.5 Améliorer la compréhension des conditions météorologiques qui favorisent un risque élevé de gel.

4.1.5.1 Tableaux récapitulatifs

Les épisodes de gel où la température minimale moyenne "non-protégées" est descendue au moins une fois sous 0 °C, sans quoi il ne serait pas possible de caractériser le type de gel en présence, sont présentés du Tableau 7 au Tableau 9.

L'effet des épisodes où une méthode a été déployée sans occurrence de gel peut toutefois être apprécié visuellement en Annexe 5 (p. 132). Les conditions moyennes présentées dans ces tableaux synthèses sont calculées à partir de la période où la température moyenne en zone non protégée (NP) est < 0 °C. Par exemple, si la température moyenne non-protégée est < 0 °C entre 2 h et 4 h, c'est le vent moyen durant cette période qui est présenté au tableau et ainsi de suite pour les autres conditions présentées.

L'utilisation de la clé diagnostique des types de gel a mené à l'identification d'un « risque faible » de gel dans plusieurs cas où le gel moyen en zone non protégée était plutôt fort (inférieur à -2,2 °C). Cela se présente pour la combinaison de conditions : vents modérés (entre 8 et 16 km/h) et ciel couvert.

La majorité des cas sont toutefois au mois d'octobre 2021, ce qui représente une période tardive. À ce moment, les risques de refroidissement par le déplacement de masses d'air froid sont plus élevés et normalement, la récolte pour le marché frais serait terminée.

Les tableaux récapitulatifs de cette section ont utilisé la comparaison de moyennes via des tableaux récapitulatifs. Ainsi, l'interprétation des données doit se faire avec précaution.

Machine à vent

Le Tableau 7 recense les épisodes de gel qui ont eu lieu lors de la période de récolte (2020 à 2022) et ceux au moment de la floraison en 2022. Pour chacun de ces épisodes, l'heure où la machine à vent a été actionnée est présentée. Il est à noter que pour 2020, l'heure indiquée demeure théorique et correspond au moment où la machine aurait été actionnée. Tout comme la différence entre la température de l'air au niveau de la sonde de mesure de la machine et celle à la hauteur des fruits. Vient ensuite la température moyenne minimale nocturne mesurée au niveau des fruits selon la distance qui sépare ce point de mesure avec la machine à vent. Il est à noter qu'à une distance de 56 m de la machine, la superficie couverte est égale à 1 ha et, respectivement de 2 et 4 ha à 80 et 113 m. Le gain de température, en contexte protégé, mesuré à une distance de 56 m de la machine a été de 0,2 à 2,5 °C. Maintenant, qu'il y ait eu ou non déploiement de la machine, la différence de température de l'air entre le sol (0,2 m) et celle à 9 m de ce dernier est présentée et elle varie de 0,8 à 6,9 °C. Toujours selon l'épisode, la vitesse moyenne du vent durant l'épisode de gel est présentée. Enfin, plus d'un type de gel est possible durant un même épisode, et cette information est présentée à la dernière colonne du tableau.

Tableau 7. Aux sites « machine à vent », températures minimales moyennes au niveau des fruits et conditions météorologiques moyennes durant le gel.

* Épisode de gel	Heure départ de la mach. (24 h) ¹	Diff. temp. 1,5 m (sonde mach.) à 0,2 m (°C) ²	Température minimale nocturne à la hauteur des fruits selon la distance (m) à la machine (°C) ³								Gain moyen de temp. (T _{56 m} vs T _{NP}) ⁴		Inversion ⁵ de temp. (°C) (9 m - 0,2 m) selon dist. (m) à la machine		Vent ⁶ moy. (km/h)	Type de gel ⁷ (% par épisode durant le gel)				
			Pas de machine								NP	(°C)	(%)	56		400	Risq. Faibl.	Radiatif		Mixte
2020 (aut.)																				
11 au 12 sept.	06:15	-	-	-	-	-	-	-	-	-8,8	-	-	4,8	-	3,5	100				
16 au 17 sept.	05:45	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,9	-	-	0,9	-	10,3	100				
17 au 18 sept.	20:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-2,7	-	-	4,8	-	5,9	10		70	20	
19 au 20 sept.	20:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-8,8	-	-	2,9	-	4,0	46	18	36		
20 au 21 sept.	20:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-5,9	-	-	6,5	-	2,0		44	56		
21 au 22 sept.	01:15	-	-	-	-	-	-	-	-	-2,4	-	-	7,5	-	2,2	100				
24 au 25 sept.	20:30	-	-	-	-	-	-	-	-	-6,3	-	-	4,8	-	6,0	18	36	36	10	
25 au 26 sept.	20:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-2,0	-	-	6,7	-	1,9	100				
2021 (aut.)				56	80		113													
3 au 4 oct.	18:50	4,2	-	-2,8	-3,6	-	-4,0	-	-	1,3	20	6,3	-	2,8	70	30				
4 au 5 oct.	00:50	2,9	-	-1,5	-1,8	-	-2,5	-	-	1,1	18	6,1	-	2,5	29	71				
5 au 6 oct.	02:25	-	-	-0,2	-0,7	-	-1,6	-	-	2,4	35	6,9	-	1,9	100					
22 au 23 oct.	18:50	-	-	-3,7	-3,6	-	-3,8	-	-	0,2	28	0,8	-	5,1	100					
2022 (aut.)				56	80		113	150		200										
1 au 2 sept.	21:30	3,9	-	0,6	-0,7	-	-1,3	-1,4	-	-1,9	1,9	42	4,6	4,0	4,0	24	76			
4 au 5 sept.	21:00	5,0	-	1,4	0,8	-	0,0	-0,1	-	-0,5	2,5	53	4,7	5,4	2,8	100				
16 au 17 sept.	22:15	3,9	-	0,9	0,4	-	0,0	-0,2	-	-0,7	0,8	33	2,3	3,7	4,0	100				
18 au 19 sept.	20:45	6,5	-	-3,1	-3,7	-	-5,2	-5,2	-	-5,4	1,5	22	6,8	6,2	3,0	99	1			
19 au 20 sept.	21:45	6,1	-	-0,9	-2,0	-	-2,8	-3,0	-	-3,7	0,6	13	4,9	7,1	1,8	100				
2022 (print.)				25	50	75	100	125	150	175	200									
23 au 24 mai	22:50	6,3	-2,5	-1,3	-1,4	-1,6	-1,9	-2,4	-2,5	-2,5	-	-	5,0	-	4,0	88	12			
24 au 25 mai	04:00	4,5	0,6	0,1	0,0	0,5	-0,2	-0,7	-1,1	-0,6	-	-	6,6	-	1,1	100				

NP = Non-protégé.

* Pour chaque épisode, les effets moyens sont calculés seulement sur la période où la température moyenne en zone non protégée (NP) est < 0 °C. Par exemple, si la température moyenne non-protégée est < 0 °C entre 2 h et 4 h, c'est le vent moyen durant cette période qui est présenté au tableau.

¹ Heure exprimée en format 24 h. Pour 2020, comme il n'y a pas de machine, c'est l'inversion au moment où le gel à 0,2 m a débuté qui est présentée.

² Différence entre la température moyenne sous le boîtier de la machine (1,5 m) et la température moyenne non-protégée à 0,2 m.

³ Température minimale calculée avec la moyenne des sondes situées à la hauteur des fruits (Mx 2201, Onset). Données seulement en zone non protégée en 2020, comme la machine a été reçue au printemps 2021.

⁴ Gain (en °C et en % par rapport à l'inversion totale) entre la température moyenne et une zone non protégée : T_{56 m} - T_{113 m} (2021) et T_{56 m} - T_{200 m} (2022).

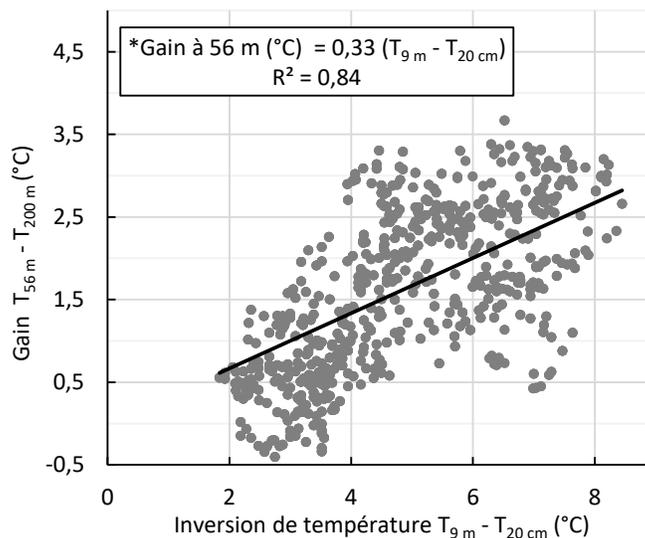
⁵ Inversion de température au moment où la machine a été déployée.

⁶ Vents moyens durant la période de gel.

⁷ Proportion du type de gel rencontrée durant la période de gel (2020-2021 : données horaires, 2022 : données aux 5 min.). Par exemple, pour un gel blanc de 2 h à 4 h et noir de 4 h à 6 h, le type de gel sera : 50 % blanc et 50 % noir.

- Non instrumenté à l'année indiquée.

À la Figure 19, l'axe horizontal représente la différence entre la température de l'air à 9 m du sol et celle au niveau des fruits (0,2 m), c'est-à-dire l'inversion de température sur le profil vertical. L'axe vertical de la figure représente le réchauffement obtenu près de la machine à 56 m (relativement à la zone non protégée à 200 m). Cela permet d'estimer « combien de degrés de réchauffement » la machine peut fournir selon « l'inversion de température » du profil vertical (9 m à 0,20 m). Des tendances s'en dégagent clairement. Le réchauffement moyen est environ 33 % ($R^2 = 0,861$) l'inversion de température (9 m à 0,2 m). Par exemple, pour une inversion de 8 °C (ex. : 10 °C à 9 m et 2 °C à 0,20 m), le gain en zone protégée serait de 2,6 °C (33 % x 8 °C). Ce pourcentage de gain, varie entre 13 et 53 % dans les épisodes mesurés.



*Gains de températures négatifs exclus, interception de la courbe a été fixée à 0.

Figure 19. Gain de température (°C) dans la zone protégée par la machine à 56 m en fonction de l'inversion de température (9 m - 0,2 m) sur les données de la tour témoin 2022 située à 400 m de la machine.

Le gain de température tend à décroître lorsque la vitesse du vent augmente (environ à plus de 4 km/h). Cette relation est présentée à Figure 20. Par exemple, avec un vent de 9 km/h, le gain moyen mesuré dans la zone protégée serait presque nul.

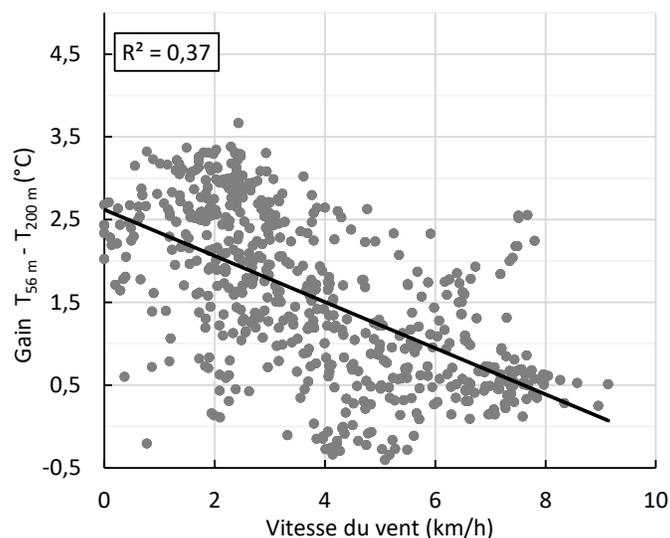


Figure 20. Gain de température à 56 m (°C) en fonction de la vitesse du vent (km/h).

Brise-vent

Un effet réchauffant du brise-vent est visible sur les moyennes, mais il est faible. L'effet du vent sur l'efficacité de la protection n'est pas clair, mais pour plusieurs épisodes ayant des vents > 5 km/h, la protection semble diminuée.

Tableau 8. Aux sites « brise-vent », températures minimales moyennes au niveau des fruits et conditions météorologiques moyennes durant le gel.

* Épisode de gel	Température minimale nocturne à la hauteur des fruits (°C) selon la distance (m) au brise-vent ¹								Vent moyen (km/h) ²	Type de gel ³ (% par épisode durant le gel)				
										Risq. Faibl.	Radiatif		Mixte	Advect.
2020		6	18		30				Blanc	Noir				
11 au 12 sept.	-	-	-	0,9	-0,4	-	-0,6	-	3,5	100				
16 au 17 sept.	-	-	-	0,3	-0,6	-	-0,7	-	10,3	100				
17 au 18 sept.	-	-	-	-1,2	-2,6	-	-2,4	-	5,9	50		30	20	
19 au 20 sept.	-	-	-	-7,7	-9,4	-	-9,7	-	4,0	73		27		
20 au 21 sept.	-	-	-	-4,6	-5,7	-	-5,9	-	2,0	44	33	22		
21 au 22 sept.	-	-	-	-1,7	-2,5	-	-2,7	-	2,2	14	86			
24 au 25 sept.	-	-	-	-4,7	-6,1	-	-6,3	-	6,0	18	36	36	10	
25 au 26 sept.	-	-	-	-1,3	-2,3	-	-2,4	-	1,9		100			
2021		6				31				Faible	Blanc	Noir	Mixte	Advect.
19 au 20 sept.	-	-	-	-0,4	-	-	-1,0	-	2,5			100		
1 au 2 oct.	-	-	-	-1,5	-	-	-2,7	-	2,8	100				
2 au 3 oct.	-	-	-	0,0	-	-	-1,3	-	4,3	100				
3 au 4 oct.	-	-	-	-4,3	-	-	-6,3	-	2,8	100				
4 au 5 oct.	-	-	-	-4,1	-	-	-5,5	-	2,5	45	55			
5 au 6 oct.	-	-	-	-2,5	-	-	-3,4	-	1,9		100			
6 au 7 oct.	-	-	-	-0,9	-	-	-1,7	-	2,2	50	50			
8 au 9 oct.	-	-	-	-0,5	-	-	-1,4	-	1,5	100				
22 au 23 oct.	-	-	-	-4,0	-	-	-4,4	-	5,1	100				
23 au 24 oct.	-	-	-	-1,5	-	-	-2,3	-	6,3	100				
2022	0	2	4	6	15	24,6	33,6	43		Faible	Blanc	Noir	Mixte	Advect.
1 au 2 sept.	0,7	0,1	-0,3	-0,6	-1,4	-1,4	-1,6	-1,6	4,0	14	86			
4 au 5 sept.	2,5	1,7	1,2	0,9	-0,2	-0,4	-1,0	-0,7	2,8		100			
17 au 18 sept.	2,4	1,8	0,9	0,3	-0,9	-1,1	-2,0	-1,8	3,5	100				
18 au 19 sept.	-2,3	-3,1	-3,6	-3,9	-4,5	-5,0	-5,6	-5,3	3,0		99		1	
19 au 20 sept.	0,5	0,2	-0,2	-0,8	-1,7	-1,9	-2,9	-2,3	1,8		100			
23 au 24 sept.	2,9	2,5	2,1	1,7	1,1	0,0	-0,7	-0,6	6,1		100			
24 au 25 sept.	1,0	0,3	-0,2	-0,4	-1,0	-1,1	-1,4	-1,3	4,4		100			
29 au 30 sept.	-3,0	-3,5	-3,7	-3,9	-4,6	-4,9	-5,4	-5,1	2,2		100			
1 au 2 oct.	-1,9	-2,4	-2,8	-3,2	-3,8	-4,9	-6,4	-5,0	5,7	48		4	48	
2 au 3 oct.	-7,8	-8,5	-9,0	-9,1	-9,8	-9,9	-10,4	-10,2	3,3		10	2	88	
3 au 4 oct.	-1,0	-1,4	-1,6	-1,8	-2,3	-2,2	-2,5	-2,4	2,3		100			
7 au 8 oct.	-0,2	-0,8	-0,9	-1,1	-1,2	-1,5	-1,7	-1,3	10,2			95	5	

* Pour chaque épisode, les effets moyens sont calculés seulement sur la période où la température moyenne en zone non protégée (NP) est < 0 °C. Par exemple, si la température moyenne non-protégée est < 0 °C entre 2 h et 4 h, c'est le vent moyen durant cette période qui est présenté au tableau.

¹ Températures minimales calculées sur la moyenne des sondes à la hauteur des fruits (Mx 2201, Onset).

² Vents moyens durant la période de gel.

³ Proportion du type de gel rencontrée durant la période de gel (2020-2021 : données horaires, 2022 : données aux 5 min.). Par exemple, pour un gel blanc de 2 h à 4 h et noir de 4 h à 6 h, le type de gel sera : 50 % blanc et 50 % noir.

- Distances non instrumentées en 2020 et 2021.

Irrigation sol sec

La méthode « irrigation sol sec » n'a pas eu d'effet protecteur selon les moyennes. Les températures maximales et minimales du sol n'étant que très faiblement plus élevées (+ 0,2 °C en moyenne) dans la zone protégée. Les températures nocturnes minimales sont souvent descendues sous le seuil critique de -2,2 °C.

Tableau 9. Aux sites « irrigation sol sec », températures minimales moyennes au niveau des fruits et conditions météorologiques moyennes durant le gel.

* Épisode de gel	Température min. nocturne à la hauteur des fruits (°C) ¹		Température max. journalière du sol (°C) à 15 cm		Température min. nocturne du sol (°C) à 15 cm		Vent moyen (km/h) ²	Type de gel ³ (% par épisode durant le gel)				
	P	NP	P	NP	P	NP		Risq. Faibl.	Radiatif		Mixte	Advect.
									Blanc	Noir		
2020												
18 au 19 sept.	-0,7	-0,7	-	-	-	-	7,6		100			
19 au 20 sept.	-9,8	-10,2	-	-	-	-	4,0	46	18	36		
20 au 21 sept.	-7,4	-7,7	-	-	-	-	2,0		55	46		
21 au 22 sept.	-3,7	-3,4	-	-	-	-	2,2		100			
24 au 25 sept.	-8,0	-7,9	-	-	-	-	6,0	18	36	36	10	
25 au 26 sept.	-3,5	-3,4	-	-	-	-	1,9		100			
2021												
5 au 6 oct.	-1,9	-1,8	-	-	-	-	1,9		100			
8 au 9 oct.	-0,7	-0,4	-	-	-	-	1,5	100				
22 au 23 oct.	-4,2	-4,1	-	-	-	-	5,1	100				
23 au 24 oct.	-2,1	-2,3	-	-	-	-	6,3	100				
2022												
23 au 24 sept.	0,2	0,0	12,4	11,9	10,1	9,9	6,1		100			
24 au 25 sept.	-1,3	-1,9	12,5	12,3	10,6	10,4	4,4		100			
29 au 30 sept.	-5,6	-6,3	12,2	11,9	9,4	9,0	2,2		74	26		
1 au 2 oct.	-4,5	-4,9	11,7	11,5	8,7	8,6	5,7	48		48	4	
2 au 3 oct.	-9,9	-11,3	10,3	10,2	7,5	7,2	3,3		2	98		
3 au 4 oct.	-3,5	-4,1	9,6	9,5	7,5	7,3	2,3		100			
7 au 8 oct.	-2,1	-2,6	10,8	10,8	8,1	8,2	10,2	55	5	10	30	

NP = Non-protégé, P = Protégé.

* Pour chaque épisode, les effets moyens sont calculés seulement sur la période où la température moyenne en zone non protégée (NP) est < 0 °C. Par exemple, si la température moyenne non-protégée est < 0 °C entre 2 h et 4 h, c'est le vent moyen durant cette période qui est présenté au tableau.

¹ Températures minimales calculées sur la moyenne des sondes à la hauteur des fruits (MX 2201, Onset).

² Vents moyens durant la période de gel.

³ Proportion du type de gel rencontrée durant la période de gel (2020-2021 : données horaires, 2022 : données aux 5 min.). Par exemple, pour un gel blanc de 2 h à 4 h et noir de 4 h à 6 h, le type de gel sera : 50 % blanc et 50 % noir.

- Température du sol non instrumenté en 2020 et 2021.

Bâche

Le Tableau 10 (page suivante) recense les épisodes de gel qui ont eu lieu durant la période de récolte (2020 à 2022). Pour chacun de ces épisodes, la température minimale nocturne à la hauteur des fruits est présentée selon le type de bâche. Toujours selon l'épisode, mais durant le jour, la température maximale de l'air qui a été atteinte sous la bâche et à l'extérieur de celle-ci est présentée. Il en va de même pour la température du sol. Sont aussi présentés dans le tableau, la vitesse moyenne du vent durant l'épisode de gel et de l'information à propos du type ou des types de gel rencontré(s). Par exemple, pour l'épisode de gel du 24 au 25 septembre 2022, la température minimale atteinte sous la bâche de 38 g/m² a été de 0,3 et 0,4 °C (2 sondes), alors qu'elle a été de -1,5 °C à l'extérieur de la bâche. La température de l'air sous la bâche a atteint un maximum de 38,2 °C et de 20,9 °C à l'extérieur de celle-ci, toujours à la hauteur des bleuets. La température du sol, à une profondeur de 15 cm, a atteint un maximum de 18,1 °C sous la bâche et un maximum de 13,0 °C à l'extérieur de celle-ci. La vitesse moyenne du vent durant l'épisode de gel a été de 4,4 km/h et le type de gel en présence était de type radiatif.

Tableau 10. Aux sites « bâche », températures minimales moyennes au niveau des fruits et conditions météorologiques moyennes durant le gel.

* Épisode de gel	Température minimale nocturne à la hauteur des fruits (°C) par type de bâche ¹			Température maximale journalière de l'air (°C) sous abri ventilé ²			Température maximale journalière du sol à 15 cm (°C)			Vent moy. (km/h) ³	Type de gel ⁴ (% par épisode durant le gel)				
	19 g/m ²	38 g/m ²	NP	19 g/m ²	38 g/m ²	NP	19 g/m ²	38 g/m ²	NP		Risq. Faibl.	Radiatif		Mixte	Advect.
												Blanc	Noir		
2020															
10 au 11 sept.	-0,1	-	-1,2	10,8	-	-	11,2	-	-	3,3	17	83			
17 au 18 sept.	-2,4	-	-1,9	30,0	-	17,1	15,9	-	12,8	5,9	9		73	18	
19 au 20 sept.	-5,9	-	-8,0	31,7	-	14,9	14,2	-	11,5	4,0	46	18	36		
20 au 21 sept.	-2,8	-	-5,2	37,8	-	20,9	15,1	-	11,5	2,0		55	45		
21 au 22 sept.	-0,1	-	-1,8	31,6	-	20,6	14,3	-	11,2	2,2		100			
24 au 25 sept.	-2,9	-	-5,2	36,5	-	19,4	15,9	-	12,9	6,0	10	40	40	10	
25 au 26 sept.	-1,0	-	-1,8	40,3	-	21,9	15,5	-	11,5	1,9		100			
2021															
	19 g/m ²	[†] 38 g/m ²	NP												
4 au 5 oct.	-2,2	-1,4	-3,4	25,9	-	19,4	12,1	-	11,4	2,5	22	78			
5 au 6 oct.	-0,8	0,1	-2,1	31,1	-	23,3	13,1	-	11,6	1,9		100			
6 au 7 oct.	0,5	1,5	-0,6	34,9	-	27,8	13,9	-	12,5	2,2		100			
22 au 23 oct.	-	-2,9	-4,9	-	-	-	-	-	-	5,1	100				
23 au 24 oct.	-	-2,1	-2,1	-	-	-	-	-	-	6,3	100				
2022															
		Centre	Bord												
1 au 2 sept.	-	0,7	0,7	-1,7	-	21,7	-	-	17,7	-	4,0	30	70		
4 au 5 sept.	-	1,9	1,6	-0,5	-	37,7	-	-	19,8	-	2,8		100		
16 au 17 sept.	-	0,1	0,5	-1,4	-	36,5	-	-	19,0	-	4,0		100		
18 au 19 sept.	-	-3,4	-3,1	-5,8	-	38,7	-	-	19,7	-	3,0		99	1	
19 au 20 sept.	-	-1,3	-0,9	-3,1	-	38,9	-	-	18,9	-	1,8		100		
24 au 25 sept.	-	0,3	0,4	-1,5	-	38,2	20,9	-	18,1	13,0	4,4		100		
29 au 30 sept.	-	-3,5	-3,1	-5,8	-	32,0	14,7	-	17,2	12,6	2,2		100		
1 au 2 oct.	-	-3,8	-3,6	-4,1	-	37,4	15,2	-	17,1	12,1	5,7	31		67	2
2 au 3 oct.	-	-8,3	-8,0	-10,6	-	35,2	12,5	-	16,4	10,6	3,3		10	88	2
3 au 4 oct.	-	-1,1	-0,9	-2,8	-	37,1	18,0	-	16,1	10,2	2,3		100		
7 au 8 oct.	-	-1,9	-2,0	-2,1	-	23,1	9,0	-	14,3	11,2	10,2			5	95

NP = Non-protégé.

* Pour chaque épisode, les effets moyens sont calculés seulement sur la période où la température moyenne en zone non protégée (NP) est < 0 °C. Par exemple, si la température moyenne non-protégée est < 0 °C entre 2 h et 4 h, c'est le vent moyen durant cette période qui est présenté au tableau.

¹ Température minimale calculée sur la moyenne des sondes à la hauteur des fruits (Mx 2201, Onset).

² Température maximale journalière à la hauteur des fruits (109, Campbell Scientific).

³ Vents moyens durant la période de gel.

⁴ Proportion du type de gel rencontrée durant la période de gel (2020-2021 : données horaires, 2022 : données aux 5 min.). Par exemple, pour un gel blanc de 2 h à 4 h et noir de 4 h à 6 h, le type de gel sera : 50 % blanc et 50 % noir.

† En 2021, 2 bâches d'une épaisseur de 19 g/m² ont été installées, totalisant 38 g/m².

- Type de protection non installée à l'année indiquée ou donnée manquante pour la date indiquée.

L'effet de la bâche 38 g/m² sur le gain de température est d'environ 1 °C par rapport à celle de 19 g/m². Pour tous les épisodes avec vents > 5,5 km/h, l'effet de la bâche n'est pas visible sur les températures moyennes à la hauteur des fruits (Figure 103 à Figure 111). La majorité des gels étaient de type radiatif (principalement des gels blancs). Les températures journalières sous la bâche montent régulièrement entre 30 et 40 °C. Bien que cela semble représenter un risque pour la conservation de la qualité du fruit, l'analyse statistique sur la fermeté ne montre pas d'effet négatif de la bâche sur cette mesure (section 4.1.5.2.2).

Des températures plus chaudes peuvent causer un retard d'acclimatation des plants à l'hiver. Un retard au niveau de la coloration des feuilles a été constaté au site avec bâche en 2022 (Figure 21). Cette différence de coloration ne s'explique pas par des dates différentes de récolte, car à l'exception des zones de mesure de la fermeté de 1 m x 1 m (non visible sur la photo), l'ensemble de la zone sous la bâche a été récolté à la même date que la zone non protégée autour de la bâche.

Or, la fauche du couvert végétal doit s'effectuer pendant la période de dormance (Gagnon et coll., 2014). Une fauche effectuée trop tôt cause une diminution des réserves de nutriments qui s'accumulent dans les rhizomes du plant pour servir à la reprise de la croissance le printemps suivant (Gagnon et coll., 2014). Faucher trop tôt peut avoir un effet limitatif sur le développement du bleuetier lorsqu'appliqué de façon répétitive (Gagnon et coll., 2014).

La dormance des plants débute après un gel mortel pour les feuilles et se termine au printemps (Gagnon et coll., 2014). Comme la bâche semble retarder cette dormance, et qu'une récolte tardive aurait aussi comme effet de retarder la dormance, une attention particulière devrait être portée avant de faucher une parcelle ayant été bâchée. Une taille au printemps pourrait permettre de réduire le risque de nuire au développement des plants.

La performance de la bâche semble être mieux décrite par la vitesse du vent que par le type de gel (nuage de points sur les moyennes non montrées). La méthode semble sensible à des vents > 5,5 km/h alors que le critère pour avoir un gel mixte, avec une proportion advective, est plus élevé, soit > 8 km/h. Toutefois, la vitesse du vent au site était mesurée à 2 m, alors que les prévisions météo sont normalement pour une hauteur de 10 m.



Figure 21. Retard de la sénescence des feuilles visibles sous la bâche, a) vue horizontale le 15 septembre 2022, et b) vue aérienne le 20 septembre 2022.

Irrigation

Le Tableau 11 recense les épisodes de gel où il y a eu déploiement de l'irrigation, sans problèmes techniques, de 2020 à 2022. La température de l'air au niveau des fruits s'est maintenue près de 0 °C, hormis pour l'épisode du 22 au 23 octobre 2021. La température en zone non protégée a quant à elle varié entre -0,1 et -6,7 °C. La vitesse moyenne du vent lors de l'épisode est présentée, tout comme le type(s) de gel en présence(s).

À plusieurs reprises durant les trois années d'essais, des problèmes techniques liés au système d'irrigation ont eu lieu (colmatage du filtreur, un problème technique avec la pompe et gicleur gelé ou s'étant déconnecté au moment du déclenchement de l'irrigation). Le suivi de températures au niveau des fruits pour tous les épisodes, incluant ceux avec des problèmes techniques, est présenté de la Figure 123 à la Figure 128 (Annexe 5, p. 132). Ces figures permettent de constater qu'un problème technique lié à l'irrigation peut mener à l'échec complet de la protection. Cela a été le cas pour les épisodes suivants : 17-18 sept. 2020, 19-20 sept. 2020 et 19-20 sept. 2022.

La formation de glace sur les bleuetiers n'a pas engendré de dommage visible au niveau des fruits, des tiges ou des feuilles. Toutefois ni le rendement ni l'abscission des fruits n'ont été quantifiés dans cette étude. L'analyse de l'évolution de la fermeté est discutée à la section 4.1.5.2.2.

Tableau 11. Aux sites « irrigation », températures minimales moyennes au niveau des fruits et conditions météorologiques moyennes durant le gel.

* Épisode de gel	Température minimale nocturne à la hauteur des fruits (°C) ¹		Vent moyen (km/h) ²	Type de gel ³ (% par épisode durant le gel)				
				Risq. Faibl.	Radiatif		Mixte	Advect.
					Blanc	Noir		
2020	P	NP						
14 au 15 sept.	-0,7	-1,6	7,1	100				
20 au 21 sept.	-0,5	-6,7	2,0	36	46	18		
2021								
3 au 4 oct.	-0,8	-4,7	2,8	100				
4 au 5 oct.	-0,3	-3,3	2,5	56	44			
5 au 6 oct.	-0,2	-2,2	1,9	100				
22 au 23 oct.	-2,2	-4,2	5,1	100				
2022								
4 au 5 sept.	0,5	-0,7	2,8	40	60			
5 au 6 sept.	1,4	-0,1	2,5	100				
16 au 17 sept.	-0,7	-2,8	4,0	100				
18 au 19 sept.	-0,9	-5,6	3,0	10	75	15		

NP = Non-protégé, P = Protégé.

* Pour chaque épisode, les effets moyens sont calculés seulement sur la période où la température moyenne en zone non protégée (NP) est < 0 °C. Par exemple, si la température moyenne non-protégée est < 0 °C entre 2 h et 4 h, c'est le vent moyen durant cette période qui est représenté au tableau.

¹ Température minimale calculée sur la moyenne des sondes à la hauteur des fruits (Mx 2201, Onset).

² Vents moyens durant la période de gel.

³ Proportion du type de gel rencontré durant la période de gel (2020-2021 données horaires, 2022 données aux 5 min.). Par exemple, pour un gel blanc de 2 h à 4 h et noir de 4 h à 6 h, le type de gel sera : 50 % blanc et 50 % noir.

4.1.5.2 Analyses statistiques

Cette section présente les résultats des analyses statistiques sur : la température au niveau des fruits (section 4.1.5.2), la fermeté (section 4.1.5.2.2), la relation entre la fermeté et les degrés-heure de gel (DH) (section 4.1.5.2.3), ainsi que la prédiction de la fermeté faite à partir de cette relation pour 2020 à 2022 (section 4.1.5.2.4).

4.1.5.2.1 Analyse statistique de la température au niveau des fruits

Le résultat de l'analyse des effets des méthodes de protections sur la température moyenne, la température minimale atteinte et sur les DH_{-2°C} (degrés heure de gel sous -2 °C, méthodologie section 3.2.7.3) sont présentés de la Figure 22 à la Figure 28. L'analyse de ces résultats est présentée ci-dessous.

Pour toutes les analyses qui modélisent le cumul de DH_{-2°C}, la date est une variable modélisée en continu (lissage).

En complément d'information pour les statistiques sur la température, la visualisation des DH_{-2°C} cumulatifs faits lors de l'exploration des données est présentée en Annexe 6, à la section « Visualisation de l'accumulation des degrés-heures gel sous DH_{-2°C} » de la Figure 136 à la Figure 141.

Bâche 19 g/m²

Ce sont les données collectées en 2020 qui ont été utilisées pour l'analyse statistique des températures pour la bâche 19 g/m². La relation utilisée pour la modélisation des données est la suivante : température ~ traitement + effet aléatoire de la sonde + date. La Figure 22 présente le résultat des modèles développés pour les températures ayant été atteintes durant les épisodes de gel selon a) la valeur moyenne atteinte, b) la valeur minimale atteinte, et c) les degrés heure gel cumulés sous -2 °C (DH_{-2°C}).

La température moyenne de l'air qui a été mesurée au niveau des fruits durant la nuit n'est pas différente selon ($p = 0,904$) peu importe qu'il s'agisse d'un contexte protégé ou non (Figure 22 a) . La température minimale (Figure 22 b) a eu tendance à être plus élevée de 0,5 °C sous la bâche ($p = 0,0842$). Enfin, les DH_{-2°C} (Figure 22 c) ont été identiques au début septembre, mais un écart de 20 °C·h a été atteint à la fin septembre. C'est-à-dire que la bâche a permis de cumuler 20 °C·h de gel de moins qu'une zone non protégée.

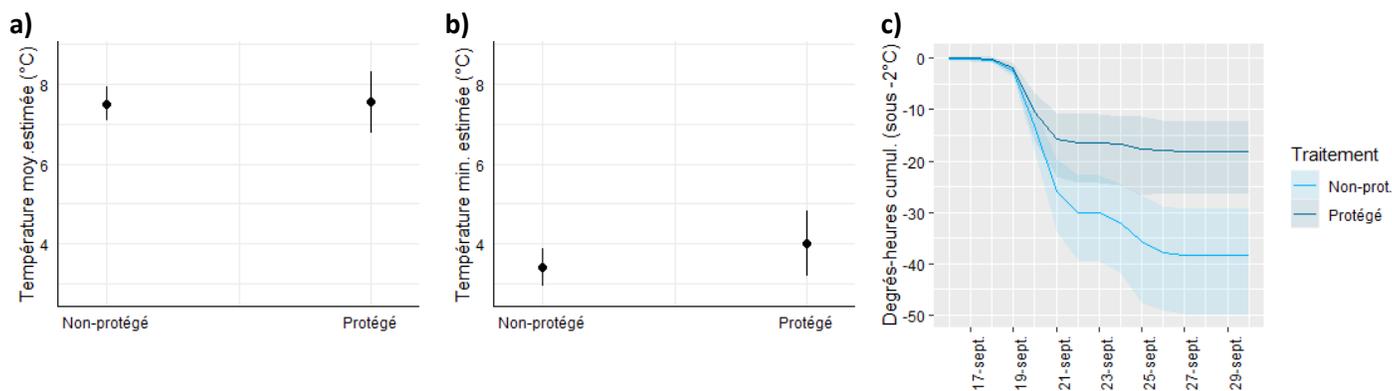


Figure 22. Au site « bâche 19 g/m² » 2020, effet de la bâche sur a) la température moyenne nocturne, b) la température minimale nocturne et les DH_{-2°C} cumulatifs. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

Bâche 38 g/cm²

Ce sont les données collectées en 2022 qui ont été utilisées pour l'analyse statistique des températures pour la bâche 38 g/m². La relation qui a été utilisée pour la modélisation des données est la suivante : température ~ traitement + effet aléatoire de la sonde + date. La Figure 23 présente la visualisation des modèles qui ont été développés pour les températures selon a) la température moyenne; b) la température minimale; et c) les DH_{-2°C}.

La bâche de 38 g/m² a eu un effet significatif sur la température moyenne et minimale durant la nuit ($p < 0,01$ et $p < 0,001$) (Figure 23 a et b). En effet, la température moyenne sous la bâche a été supérieure d'environ 0,6 °C, alors que la température minimale l'a été d'environ 1,1 °C. La bâche a aussi réduit les DH_{-2°C} cumulatifs d'environ 20 °C·h à la fin septembre et d'environ 50 °C·h au début octobre (Figure 23 c), par rapport à une zone non protégée.

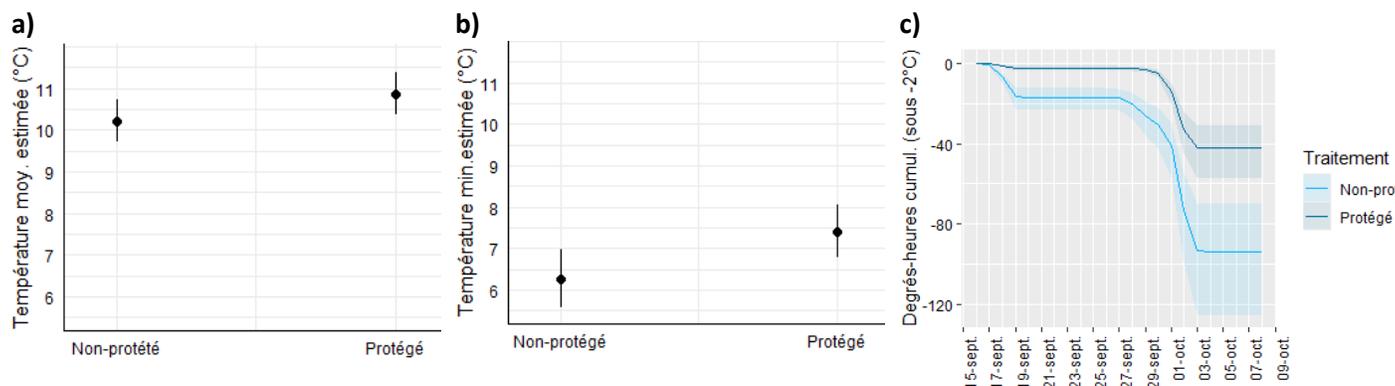


Figure 23. Au site « bâche 38 g/m² » 2022, effet de la bâche sur a) la température moyenne nocturne, b) la température minimale nocturne et c) les DH_{-2°C} cumulatifs. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

Irrigation

Pour les sites irrigués, les données collectées pour toutes les années ont été utilisées. La relation qui a été utilisée pour la modélisation des données est la suivante : température ~ traitement + effet aléatoire de la sonde de température + date. La Figure 24 présente la visualisation des modèles pour a) la température moyenne; b) la température minimale; et c) les DH_{-2°C}.

Tel que présenté à la Figure 24 a et b, l'irrigation a eu un effet significatif sur la température moyenne et minimale durant la nuit ($p < 0,001$). Pour les périodes de gel mesurées de 2020 à 2022, l'irrigation a permis d'augmenter la température moyenne d'environ 1,4 °C et la minimale, d'environ 2,2 °C.

Il faut considérer que les écarts entre protégé et non-protégés, par rapport au minimum et au maximum, sont tributaires des conditions de gel ayant eu lieu. Comme la protection par l'irrigation ramène les températures à 0 °C, des nuits avec des gels plus intenses, créent un plus grand écart. L'amplitude des écarts change donc selon le type de gel en présence. Dans les données recueillies, il n'y a généralement pas eu de différence (pas de gel dans le non irrigué et dans irrigué) et quelques nuits avec de grandes différences.

L'irrigation a eu un effet significatif sur les DH_{-2°C} cumulatifs à $p < 0,001$ (Figure 24, c). Cela témoigne bien de ce principe où l'effet sur l'accumulation de gel sous -2 °C est maintenu à près de 0 °C·h par nuit. Pour les nuits observées et les conditions en présence, l'irrigation a réduit les DH_{-2°C} cumulatifs d'environ 2 °C·h.

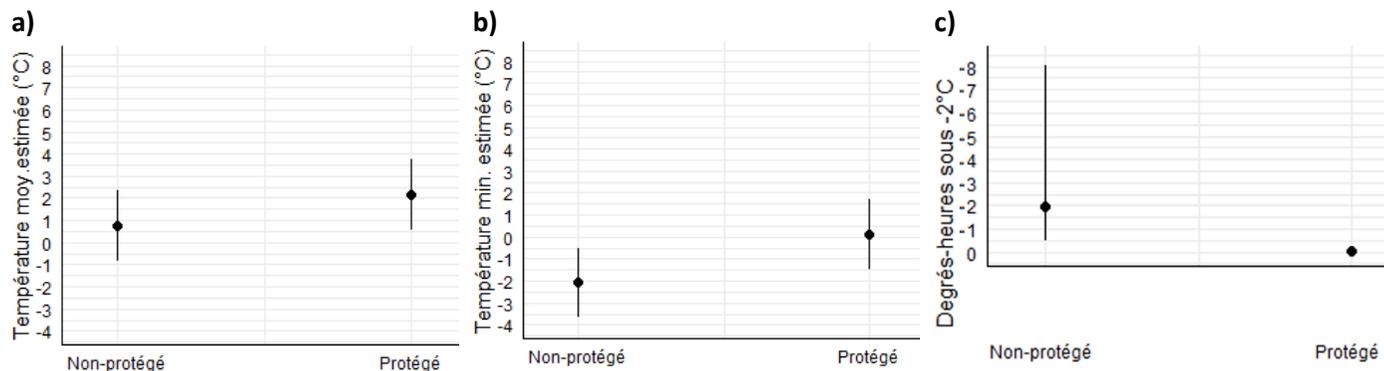


Figure 24. Aux sites « irrigation » pour toutes les périodes protégées, effet modélisé de l'irrigation sur a) la température moyenne (nuit), b) la température minimale (nuit) et c) les DH- $_{-2^{\circ}\text{C}}$ pour une nuit. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

Brise-vent

Au site « brise-vent », les données de 2022 ont été considérées à partir du 15 septembre, soit au moment où le risque de gel devient plus important. La relation utilisée pour la modélisation des données est la suivante : température \sim date + distance au brise-vent + effet aléatoire de la sonde de température.

La Figure 25 présente le résultat des modélisations pour l'effet de la date sur la température pour a) la température moyenne; b) la température minimale; et c) les DH- $_{-2^{\circ}\text{C}}$. Pour la température moyenne de la nuit (Figure 25 a), celle-ci a diminué significativement en fonction de la distance au brise-vent ($p < 0,001$). La Figure 26 présente la visualisation du modèle pour l'effet de la distance au brise-vent sur la température. Cette figure permet de constater que l'effet sur la température moyenne était faible (Figure 26 a). La différence de température a décru d'environ 1,5 °C sur 40 m et de façon plus rapide dans les premiers 10 à 15 m.

La température minimale de la nuit a aussi diminué en fonction de la distance au brise-vent ($p < 0,001$) (Figure 25, b). L'effet a cependant eu une portée limitée. La différence sur les températures minimales était d'environ 1,5 à 2 °C et elle chutait principalement dans les 10^{ers} m (Figure 26, b). Le brise-vent a permis de réduire l'accumulation des degrés-heures de gel (sous -2 °C) cumulatifs ($p < 0,001$) (Figure 26, c).

La Figure 25 c montre l'accumulation de gel sous -2°C (DH- $_{-2^{\circ}\text{C}}$) à 2 m, 10 m, 20 m et 40 m du brise-vent en 2022. À la fin septembre, 40 m avait cumulé -25 °C·h alors que 2 m avait cumulé -5 °C·h (pour une différence d'environ 20 °C·h). À la fin octobre, 40 m avait cumulé -130 °C·h et 2 m avait cumulé -40 °C·h (pour une différence d'environ 90 °C·h). Ce qui fait que, début octobre, l'accumulation de gel était de 90 °C·h moins élevée dans la zone à la portée du brise-vent.

Au début de l'automne, il n'y avait pas encore de différence importante, car il y a eu peu de gel. Au début octobre, cependant, la différence était plus importante. Près du brise-vent, le gel cumulatif restait en bas de -50 °C·h, alors qu'il atteignait les -140 °C·h à 40 m du brise-vent. Autrement dit, l'accumulation de gel (sous -2°C) a été trois fois moins grande près du brise-vent qu'au centre de la parcelle.

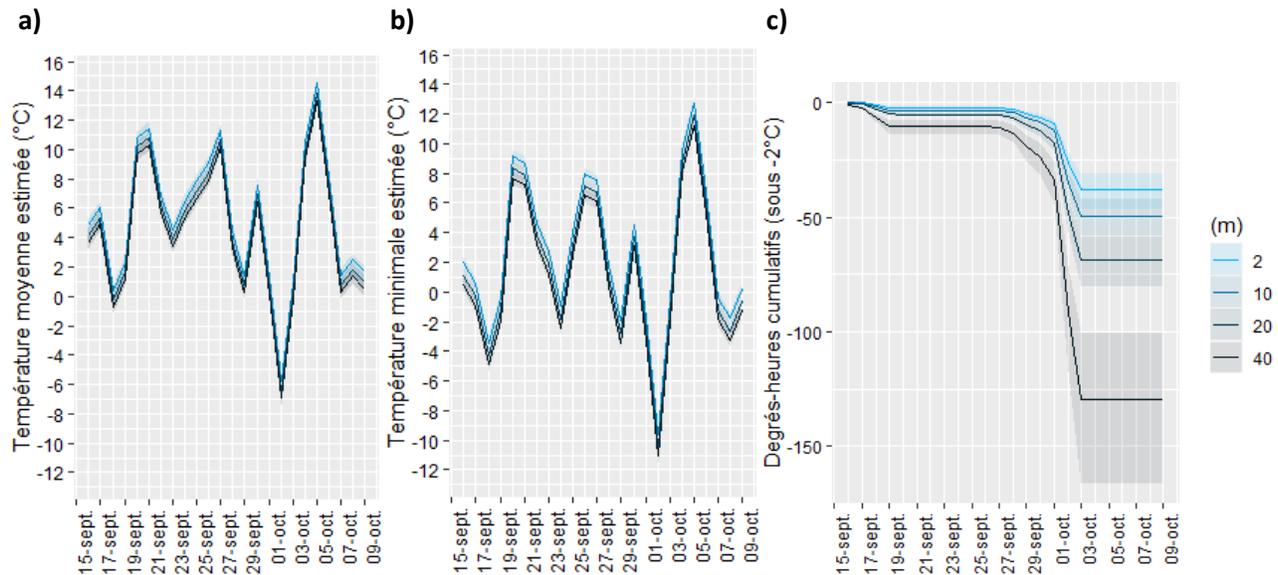


Figure 25. Au site « brise-vent » 2022, effet de la date sur a) les températures moyennes, b) les températures minimales, et c) les DH_{-2°C} cumulatifs, modélisés pour trois distances au brise-vent. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

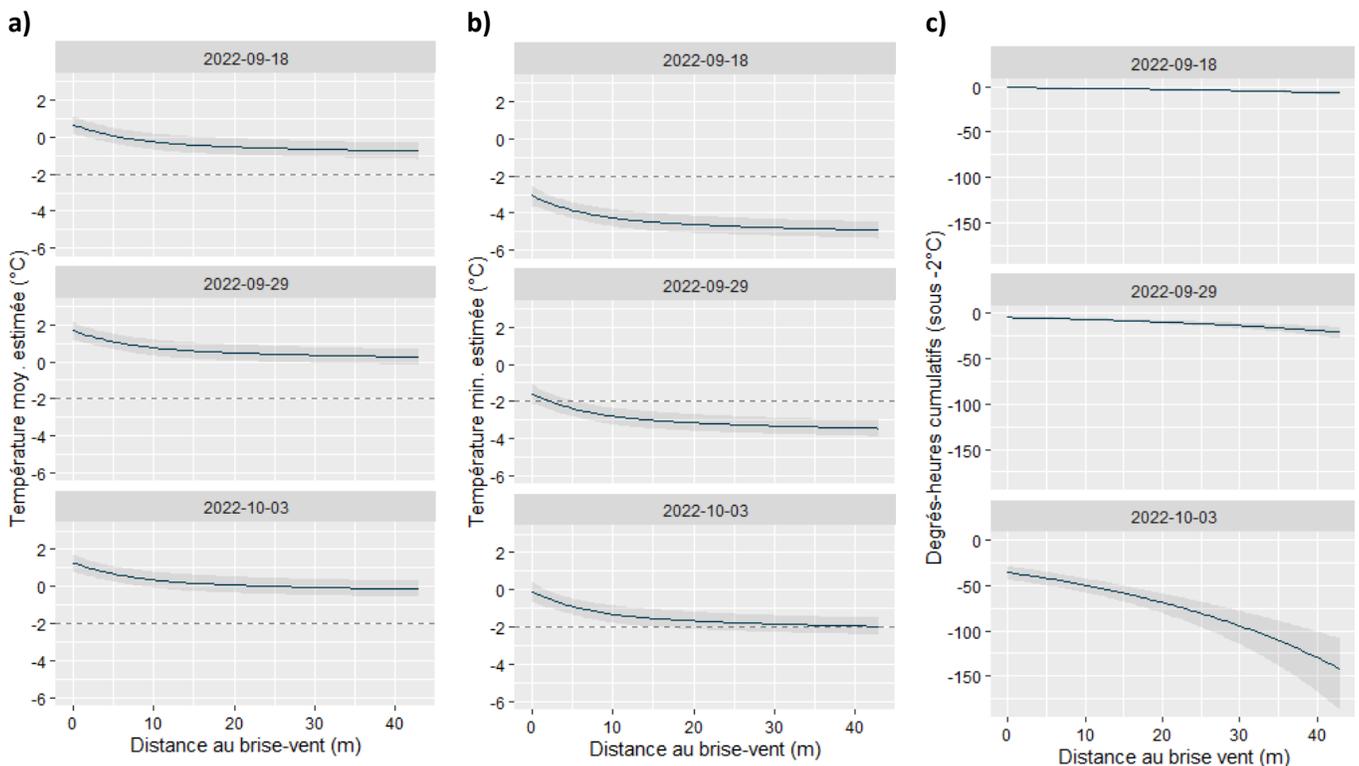


Figure 26. Au site « brise-vent » 2022, effet du brise-vent sur a) la température moyenne (nuit), et b) la température minimale (nuit) et c) les DH_{-2°C} cumulatifs, tous modélisés pour trois dates sélectionnées. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

Irrigation du sol sec

Les données de 2022 ont été considérées à partir du 15 septembre, date à laquelle le risque de gel devient plus important (il n'y a presque pas eu de gel (sous $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$) en 2021 et peu en 2020). La relation utilisée pour la modélisation des données est la suivante : température \sim traitement + effet de la date + effet aléatoire de la sonde de température. La Figure 27 présente la visualisation du modèle pour l'effet de l'irrigation du sol sec sur a) la température moyenne, b) la température minimale et c) les $\text{DH}_{-2^{\circ}\text{C}}$.

La méthode « irrigation sol sec » a augmenté la température moyenne d'environ $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figure 27, a), avec un effet presque significatif à $p = 0,051$. Cette méthode a augmenté la température minimale d'environ $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($p = 0,0352$) avec un effet significatif (Figure 27, b). La méthode « irrigation sol sec » a eu très peu d'effet sur l'accumulation de gel (sous $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$) excepté au début octobre, quand la différence entre protégé et non-protégé a atteint environ $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ (Figure 27 c).

Finalement, un sol plus humide a permis l'atteinte de température plus haute, mais avec une protection très faible en regard des températures minimales. Il n'y a donc pas d'intérêt agronomique pour cette méthode, dans la mesure où elle est utilisée dans le but de repousser la date de récolte.

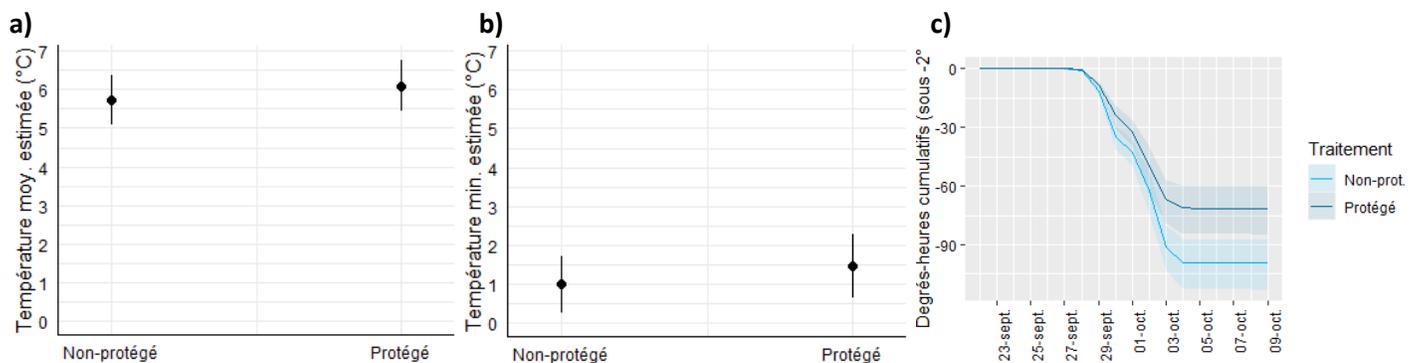


Figure 27. Au site « irrigation sol sec » 2022, effet du sol plus humide modélisé sur a) la température moyenne (nuit), b) la température minimale (nuit), et c) les $\text{DH}_{-2^{\circ}\text{C}}$ cumulatifs, modélisés. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

Machine à vent

Les données utilisées pour la modélisation sont celles qui ont été obtenues durant les périodes de déploiement de la machine à l'automne 2021 et celui de 2022. La relation utilisée pour la modélisation des données est la suivante : température \sim date + distance à la machine + effet aléatoire de la sonde de température. La Figure 28 présente la visualisation du modèle pour l'effet de la machine sur a) la température moyenne; b) la température minimale pour des dates présentées en exemples, ainsi que; c) les $\text{DH}_{-2^{\circ}\text{C}}$.

La température moyenne de la nuit a diminué significativement en fonction de la distance à la machine à vent ($p < 0,001$). Le gain moyen était d'environ $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ devant la machine (avec une erreur toutefois plus grande dans les premiers 50 m) et s'estompait sur 100 m avec un effet presque nul à partir de 75 à 100 m (Figure 28, a). Selon la température minimale modélisée, le gain à 50 m de la machine est d'environ $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (comparativement à 200 m) et l'effet s'estompait progressivement en s'éloignant linéairement (Figure 28 b).

Pour caractériser les $DH_{-2^{\circ}C}$ de la machine, la distance a été traitée comme une valeur catégorielle. Les trois distances correspondant à des superficies d'intérêts ont été retenues et celles-ci ont permis de combiner les données obtenues pour les deux années avec la machine. Les résultats de la modélisation, pour les $DH_{-2^{\circ}C}$ par nuit étaient d'environ (Figure 28 c) :

- 56 m (1 ha) : 1,8 °C·h
- 80 m (2 ha) : 2,5 °C·h
- 113 m (4 ha) : 3,6 °C·h

Cette relation n'est pas ressortie significative (56 vs 80 m à $p = 0,5864$; 56 m vs 113 m à $p = 0,0691$; 56 m vs 80 m à $p = 0,2722$). Il est à noter qu'il y avait beaucoup d'incertitude, par exemple, l'accumulation de gel dépend de la température qui elle-même est très variable d'une nuit à l'autre. Cette variabilité est visible sur les cartes thermiques (en annexe) et discutées à la section 4.1.5.3.

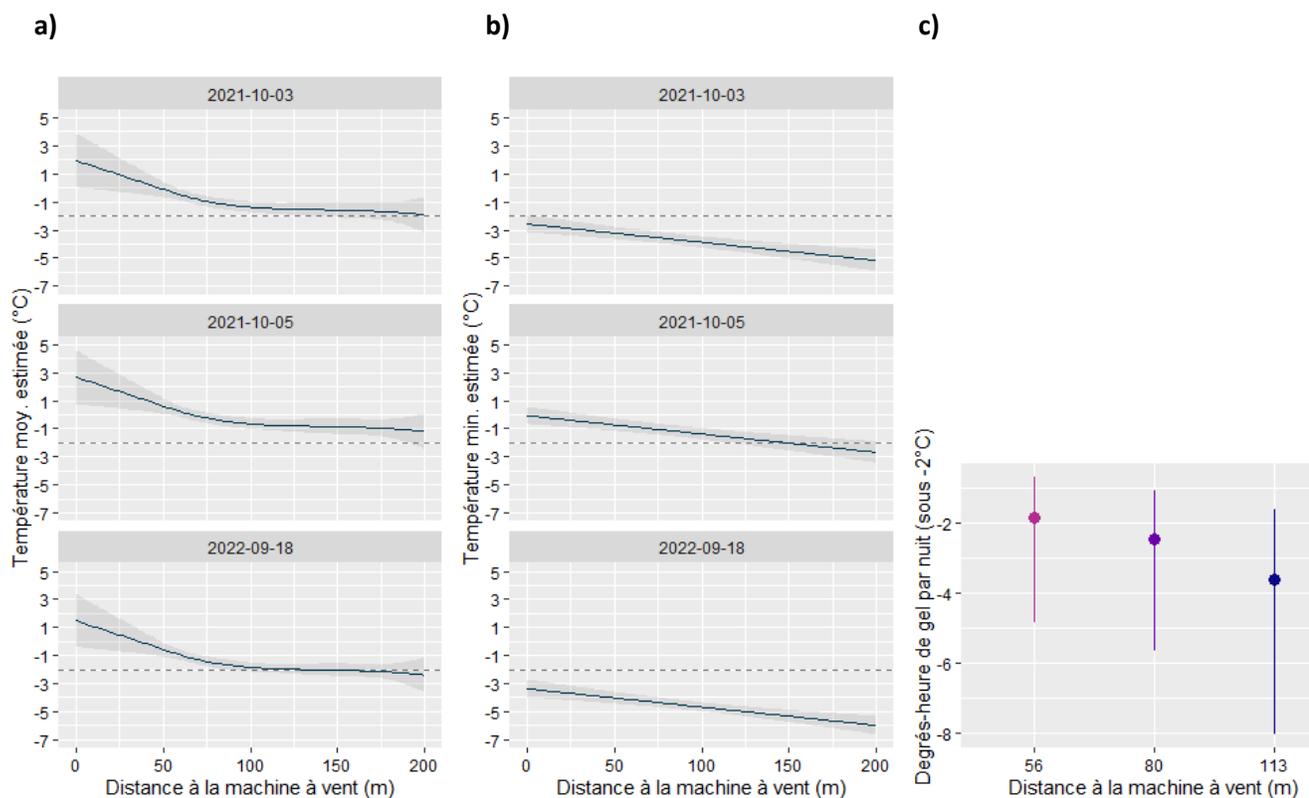


Figure 28. Aux sites « machine à vent », effet de la machine modélisé sur a) la température moyenne (nuit), b) la température minimale (nuit) pour trois dates sélectionnées, ainsi que c) sur l'accumulation des $DH_{-2^{\circ}C}$ (résultat pour toutes les périodes protégées 2020 et 2021). Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

4.1.5.2.2 Analyse statistique sur la fermeté

Les données utilisées pour la modélisation de la fermeté du bleuets ont été recueillies en 2022. La mesure de la fermeté des bleuets a débuté le 7 septembre 2022. Un épisode de gel s'approchant de -2°C dans les zones non protégées a eu lieu la nuit du 1^{er} au 2 septembre. Les figures suivantes présentent visuellement les modèles de fermetés qui ont été retenus.

Machine à vent

La machine à vent n'a pas eu d'effet sur le maintien de la fermeté des bleuets. La visualisation de la modélisation statistique est montrée à la Figure 29, où la bande grise est le résultat de la modélisation de la fermeté en fonction de la date, et les points sont les valeurs réellement mesurées. La fermeté décroît en fonction du temps seulement.

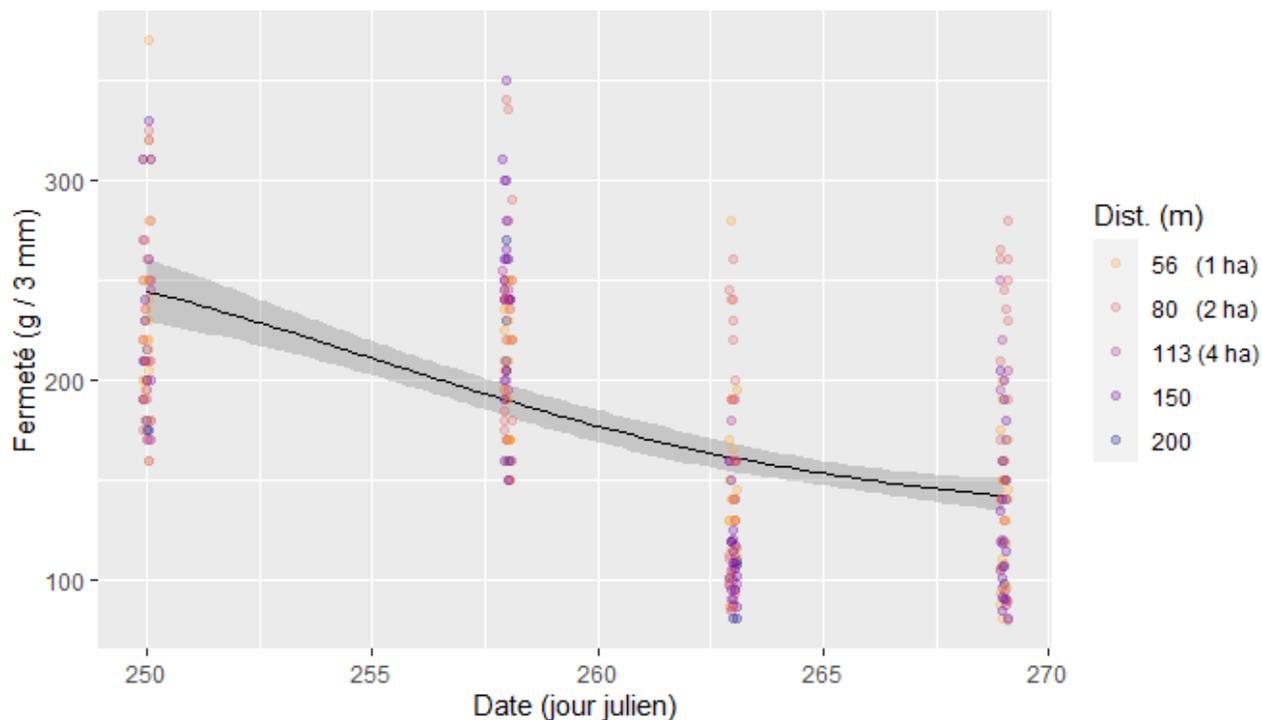


Figure 29. Au site « machine à vent » 2022, fermeté du bleuets (g/3 mm) en fonction de la distance à la machine et du jour de l'année, selon le résultat du modèle additif généralisé. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

Bâche 38 g/cm²

La bâche a permis de maintenir les bleuets significativement plus fermes en zone protégée. Le résultat de la modélisation statistique est montré à la Figure 30, où les bandes de couleurs sont le résultat de la modélisation et les points sont les valeurs réellement mesurées. La fermeté a décliné en fonction de la date et il y a eu un effet de traitement. La fermeté a décliné plus rapidement pour les bleuets non protégés (en mauve). Au 26 septembre les bleuets protégés (en orange) étaient environ 50 % plus fermes que les non-protégés (en mauve). Fermeté au 26 septembre : P ≈ 225 g/3 mm ; NP ≈ 150 g/3 mm.

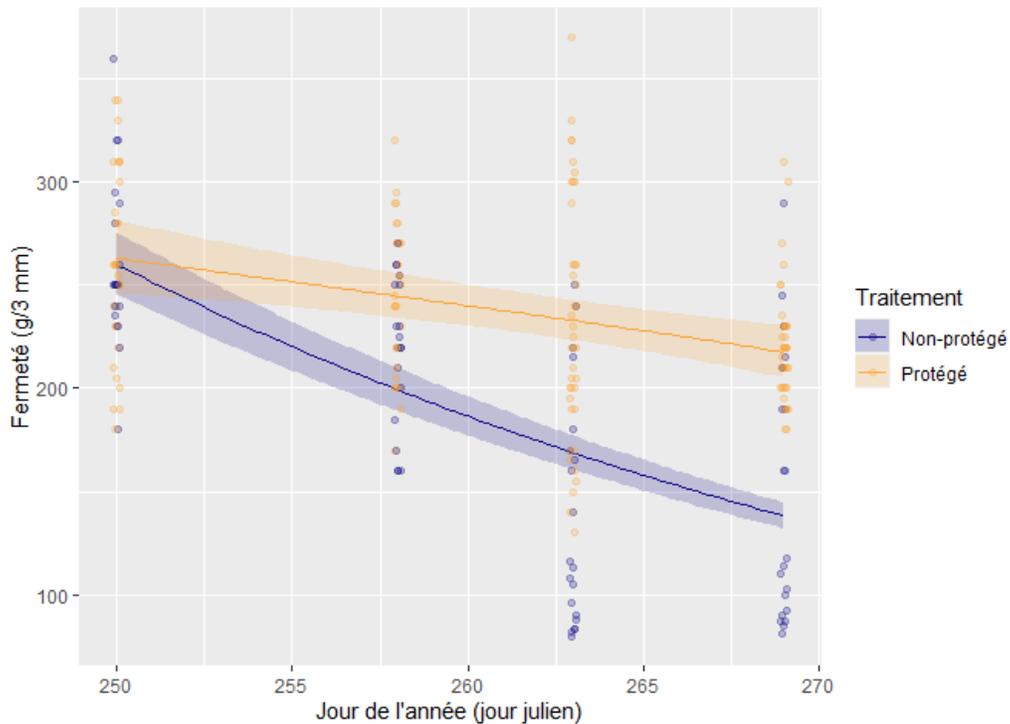


Figure 30. Au site « bâche 38 g /m²» 2022, fermeté du bleuets (g/3 mm) selon le traitement (protégé ou non-protégé) en fonction du jour de l'année, selon le résultat du modèle additif généralisé. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

Brise-vent

Le brise-vent a permis de maintenir les bleuets significativement plus fermes lorsqu'ils sont près de ce dernier, bien que l'effet soit faible. Le résultat de la modélisation statistique est montré à la Figure 31, où les bandes de couleurs sont le résultat de la modélisation et les points sont les valeurs réellement mesurées. L'effet de la date et de la distance du brise-vent sont significatifs. La Figure 31 a montre que la fermeté a décru en fonction de la distance au brise-vent, et en b, que la fermeté a décru en fonction de la date. Au 26 septembre, les bleuets situés à une distance de 2 m du brise-vent étaient environ 10 % plus fermes que ceux qui en étaient plus loin (43 m). Fermeté au 26 septembre : 2 m \approx 150 g/3 mm ; 43 m \approx 135 g/3 mm.

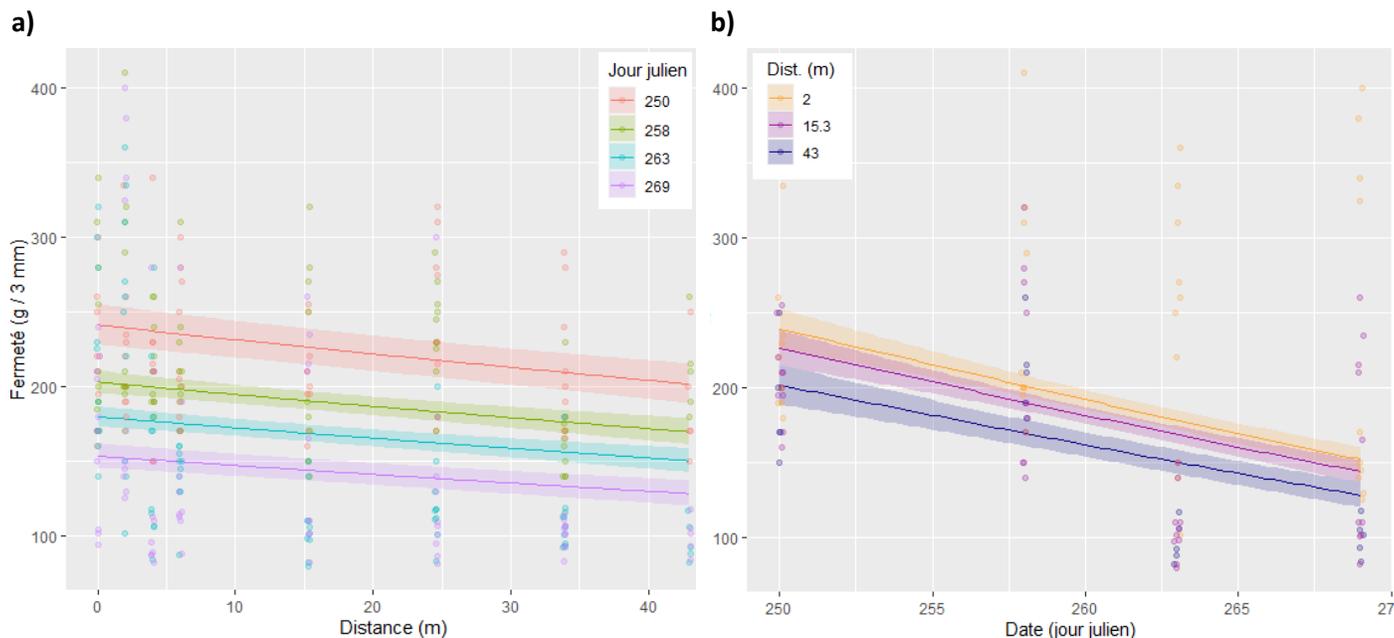


Figure 31. Au site « brise-vent » 2022, fermeté du bleuets (g/3 mm) en fonction de la distance au brise-vent et du jour de l'année, selon le résultat du modèle additif généralisé. Résultats représentés a) à toutes les distances et b) à 2 m, 15,3 m et 43 m (centre du brise-vent). Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

Sol sec

L'irrigation du sol sec n'a pas eu d'effet significatif sur le maintien de la fermeté des bleuets. Le résultat de la modélisation statistique est montré à la Figure 32. La bande grise est le résultat de la modélisation de la fermeté qui a décliné en fonction du temps et les points sont les valeurs réellement mesurées.

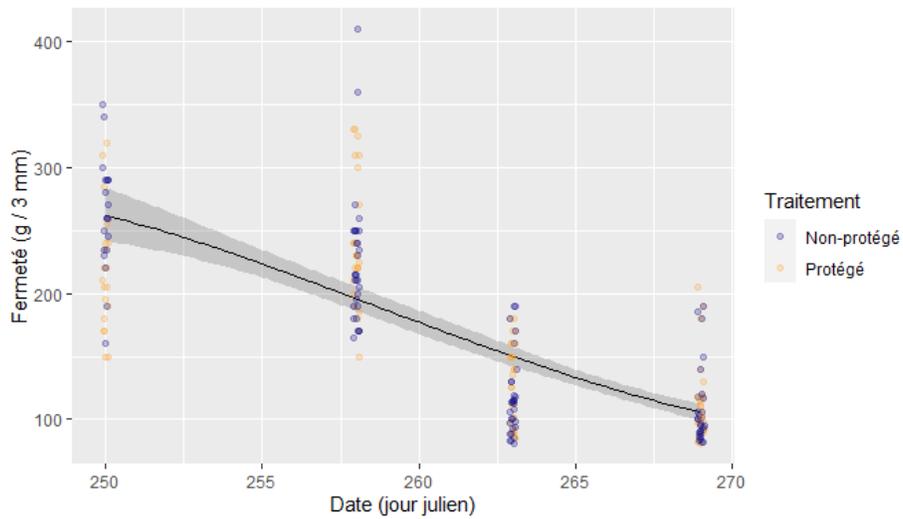


Figure 32. Au site « irrigation du sol sec » 2022, fermeté du bleuet (g/3 mm) selon le traitement (protégé ou non-protégé) en fonction du jour de l'année, selon le résultat du modèle additif généralisé. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

Irrigation

L'irrigation a permis de maintenir les bleuets significativement plus fermes en zone protégée. Le résultat de la modélisation statistique est montré à la Figure 33 où les bandes de couleurs sont le résultat de la modélisation, et les points sont les valeurs réellement mesurées. Cette figure montre que la fermeté a décliné en fonction du temps. Avec l'irrigation la fermeté a décliné moins rapidement qu'en zone non protégée. Au 26 septembre, les bleuets protégés étaient environ 15 % plus fermes que les non-protégés. Fermetés au 26 septembre : P \approx 160 g/3 mm ; NP \approx 140 g/3 mm.

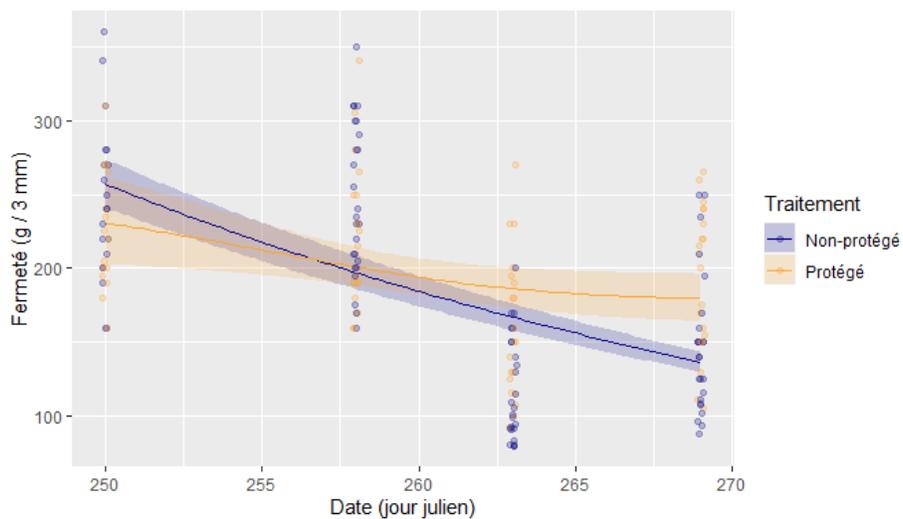


Figure 33. Au site « irrigation » 2022, fermeté du bleuet (g/3 mm) selon le traitement (protégé ou non-protégé) en fonction du jour de l'année, selon le résultat du modèle additif généralisé. Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

En conclusion, pour le résultat d'analyse statistique sur la fermeté, les méthodes de protection de la bâche, du brise-vent et de l'irrigation ont eu un effet protecteur significatif sur la fermeté du bleuet, tandis que la machine à vent et l'irrigation du sol sec ne l'ont pas été.

La comparaison des sites entre eux ne doit pas mener à des conclusions faciles. Ces sites ont évolué dans des environnements différents qui sont conséquents à des conditions climatiques locales spécifiques. De plus, la valeur initiale de fermeté avant le premier gel n'a pas été mesurée. Nonobstant ces faits, il est intéressant de constater que la zone protégée du site avec bâche a obtenu des valeurs de fermetés environ deux fois plus élevées que celles mesurées dans l'ensemble des autres sites. Les valeurs mesurées le 26 septembre, en g/3mm, ont été de 100 pour l'irrigation du sol sec, de 150 pour la machine à vent et le brise-vent, de 160 pour l'irrigation et de 225 pour la bâche.

4.1.5.2.3 Relation entre la fermeté et les degrés-heure de gel (DH)

L'analyse exploratoire sur la relation entre l'accumulation de gel (en degrés heures sous -2°C , soit $\text{DH}_{-2^{\circ}\text{C}}$) et la fermeté a permis de construire un modèle qui met en relation la fermeté en fonction de l'accumulation du nombre d'heures de gel (ex. sites brise-vent Figure 34). L'analyse exploratoire sur la fermeté et ses variables explicatives a permis de constater que la fermeté est mieux prédite par l'accumulation de gel que par la date ou la méthode de protection. Un modèle qui utilise l'accumulation de gel (en degrés heures $< -2^{\circ}\text{C}$, soit $\text{DH}_{-2^{\circ}\text{C}}$) pour prédire la fermeté a été développé.

Mesurer la fermeté peut être un exercice chronophage, mais permet d'obtenir un critère important pour l'évaluation de la qualité du bleuets. Utiliser un modèle qui prédit la fermeté avec assez de précision permet d'éviter d'avoir à effectuer cette mesure. Seule la température à la hauteur des fruits est nécessaire au calcul des degrés-heures-gel.

Préciser le modèle entre les degrés-heure-gel et la fermeté pourrait permettre de répondre aux questions suivantes en cours de saison :

- À quelle date y a-t-il un risque de perdre la production en absence de méthode de protection contre le gel?
- Quel est le $\text{DH}_{-2^{\circ}\text{C}}$ critique qui sera atteint dans les prochains jours? Selon :
 - Les prévisions météo;
 - Le type de méthode de protection (machine, bâche, irrigation, brise-vent, aucune méthode, autres méthodes) disponible;
 - La présence ou non, de ces méthodes lors des gels précédents.

Pour y parvenir, d'autres interrogations doivent être résolues comme l'identification du seuil critique de $\text{DH}_{-2^{\circ}\text{C}}$, selon le type de marché, au-delà duquel le bleuets sauvage cultivé est non vendable ou non récoltable. Le modèle devrait aussi être calibré avec plus de données.

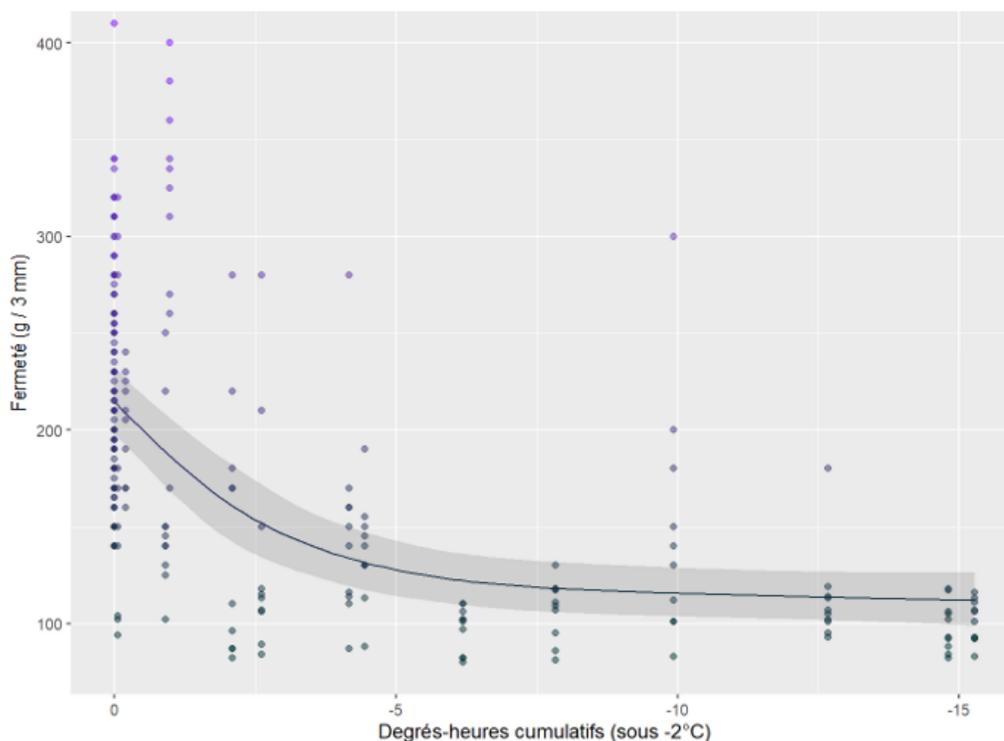


Figure 34. Avec les données des sites « brise-vent », relation entre la fermeté du bleuets (g/3 mm) et les $\text{DH}_{-2^{\circ}\text{C}}$. La bande grise montre les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

4.1.5.2.4 Prédiction de fermeté pour 2020-2022

Le modèle qui prédit la fermeté en fonction du temps passé sous le seuil de -2°C ($\text{DH}_{-2^{\circ}\text{C}}$) a été tracé pour les 3 années (Figure 35). La moyenne des valeurs mesurées par l'ensemble des sondes de température en zone non protégée a été utilisée comme point d'entrée.

Pour les trois années, la modélisation de la fermeté selon les $\text{DH}_{-2^{\circ}\text{C}}$ permet de constater que la perte de fermeté chute « par palier ». Ces paliers correspondent à des nuits de gels plus intenses. En 2020, ce sont les nuits des 19 au 20 sept. et 20 au 21 sept. (jour julien : 262, 263) qui causent cette perte, avec des minimums nocturnes atteignant -10°C à certains endroits. En 2021, ce sont les 3 au 4 oct. et 4 au 5 oct. (jour julien : 276, 277) que la perte plus importante a été atteinte avec un minimum de -6°C à certains endroits. Enfin, en 2022, la perte de fermeté est majoritairement causée par les gels des 18 au 19 sept. et 19 au 20 sept. (jour julien : 261, 262) avec un minimum de -6°C par endroit. Ces derniers ont été suivis d'une période plus clémente de 10 jours avant les gels intenses de fin septembre (29 septembre au 3 octobre).

De quelle façon la production aurait-elle été impactée par le gel automnal dans un contexte de bleuets sauvage cultivé qui est récolté pour le marché frais? En 2020, 2021, et 2022, les pertes de fermetés significatives auraient été présentes aux dates décrites ci-dessus. Ces dates auraient aussi pu être prédites et/ou suivies en continu, en utilisant la même relation et en la combinant avec les données de prévision et les données historiques des stations météo avoisinantes.

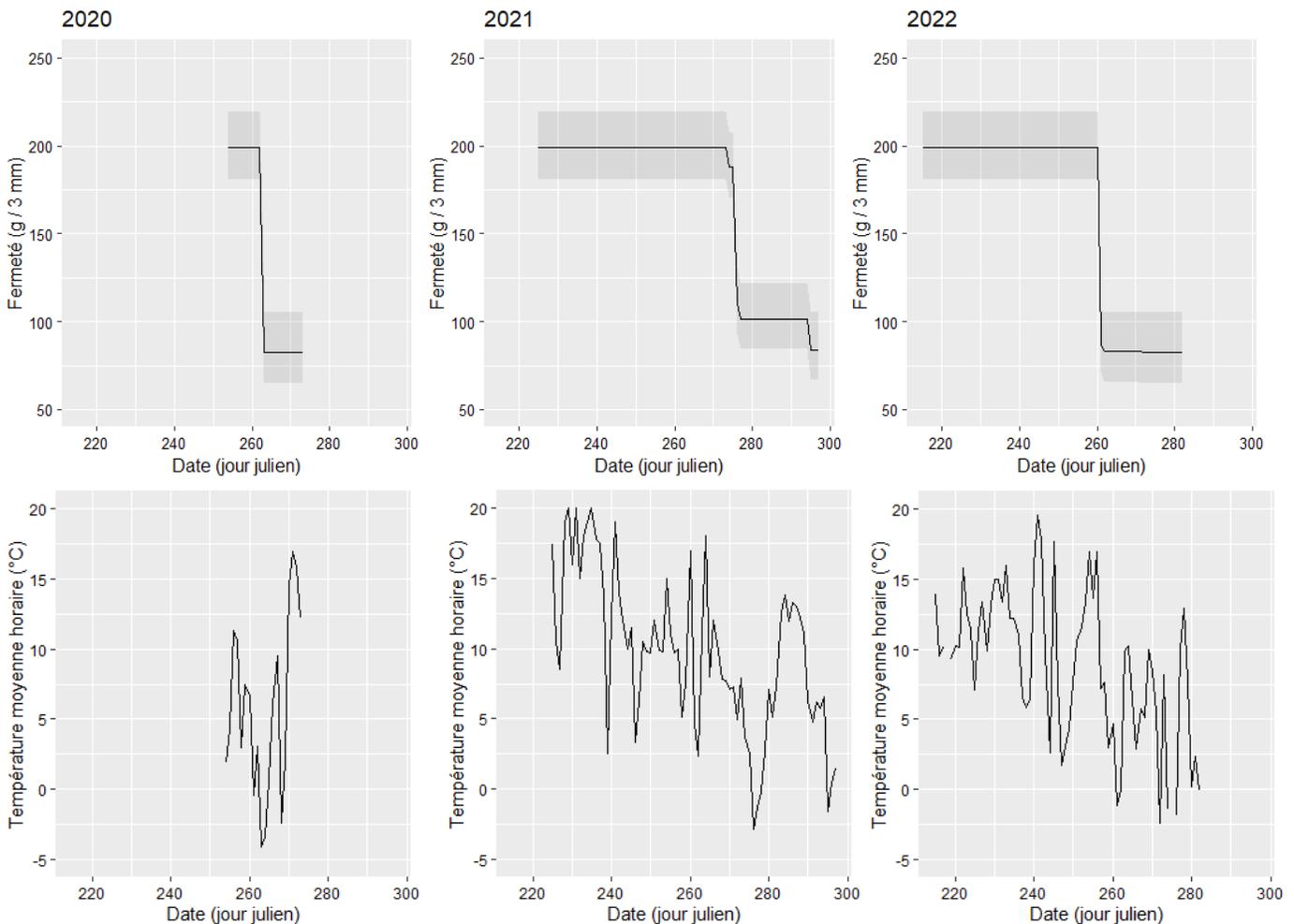


Figure 35. Fermeté prédite en fonction des $\text{DH}_{-2^{\circ}\text{C}}$, et représentée en fonction (en haut) de la date pour les trois années du projet, et (en bas) de la température moyenne horaire sur la ferme (non-protégé). Les graphiques montrent les valeurs estimées par le modèle avec intervalles de confiance de 95 %.

4.1.5.3 Cartes d'interpolation spatiales

Les cartes thermiques des sites sont présentées en annexe (p. 196) pour 11 dates sélectionnées (comme expliqué à la section 3.2.7.2). Les effets principaux qui en ressortent sont discutés ici-bas, et certaines cartes avec des faits saillants sont présentées.

Machine à vent

Le gradient de l'effet de la machine n'est pas uniformément décroissant en fonction de la distance. La Figure 36, tirée des épisodes présentés en annexe (18 au 19 sept. 2022), illustre bien cela. Il y a un effet clair à 56 m de la machine à 00:00, mais il s'estompe par la suite du côté sud-ouest de 2:00 à 6:00. Les 56^{ers} m n'étaient pas toujours protégés selon la même orientation par rapport à la machine. Le 20 septembre à 4:00 (Figure 37) la protection est du côté sud, tandis que le 19 septembre à la même heure (Figure 36), la protection était du côté est. Aussi, avec une analyse visuelle des cartes, la relation entre la protection et la topographie ou entre la protection et la direction du vent n'est pas claire.

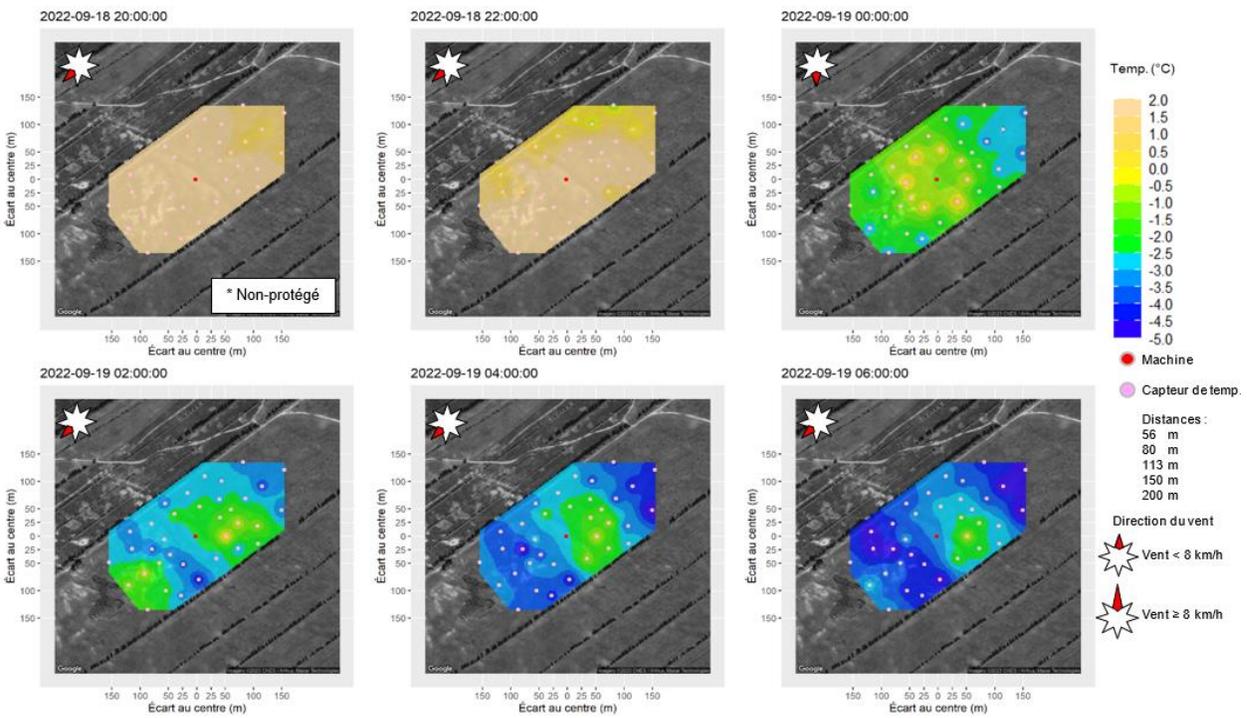


Figure 36. Au site « machine à vent » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

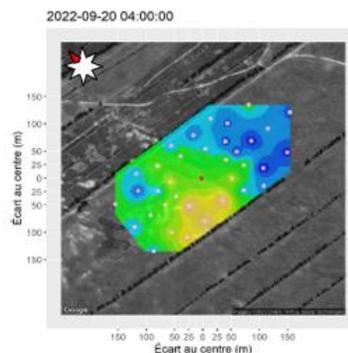
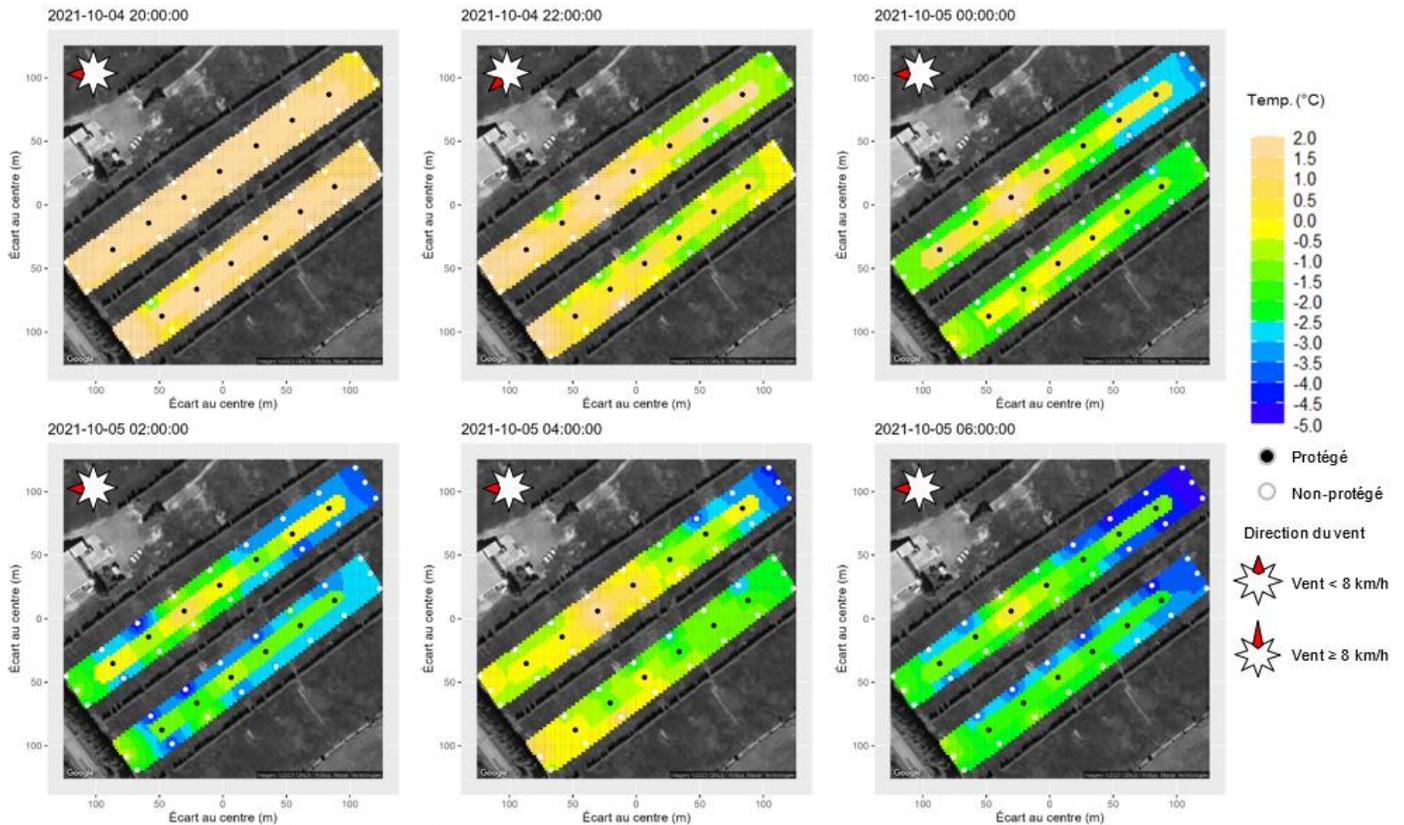


Figure 37. Au site « machine à vent » le 20 septembre 2022 à 4:00, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits (toutes les heures de cette date sont disponibles en annexe).

Bâche

L'effet de la bâche est visible et uniforme pour la majorité des épisodes présentés sur les cartes thermiques. Un exemple de cartes est présenté ci-dessous pour la nuit du 4 au 5 octobre 2021 à la Figure 38.



N.B. 1 : Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche et autour de la bâche.
N.B. 2 : Bâches de haut en bas : (haut) $2 \times 19 \text{ g/m}^2$ pour un total de 38 g/m^2 , (bas) 19 g/m^2 .

Figure 38. Aux sites « bâche 19 g/m^2 » et « bâche 38 g/m^2 » la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures ($^{\circ}\text{C}$) de l'air à la hauteur des fruits.

Sur le site 2021, une zone plus froide notable est visible du côté ouest. Le côté ouest de la parcelle est bordé par un boisé et face à une pente descendante (selon les lignes de niveau de la Figure 39). Un boisé dense en bas de pente est propice à l'accumulation d'air froid et pourrait expliquer la zone plus froide observée à l'est de la parcelle pour le site bâche 2021.



Figure 39. Aux sites « bâche 19 g/m² » et « bâche 38 g/m² », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.

Brise-vent

Les sites brise-vent ont tous été installés sur des sites avec de très faibles pentes et les épisodes présentés sont des épisodes caractérisés par de faibles vents (< 8 km/h). Sans surprise, l'effet observable de la pente et du vent ne sont pas clairs à partir des cartes produites.

Les cartes thermiques des sites brise-vent montrent généralement des températures plus froides au centre du champ. La Figure 40 illustre bien l'effet caractéristique d'un gel radiatif (blanc), épisode qui s'est produit durant la nuit du 18 au 19 septembre 2022.

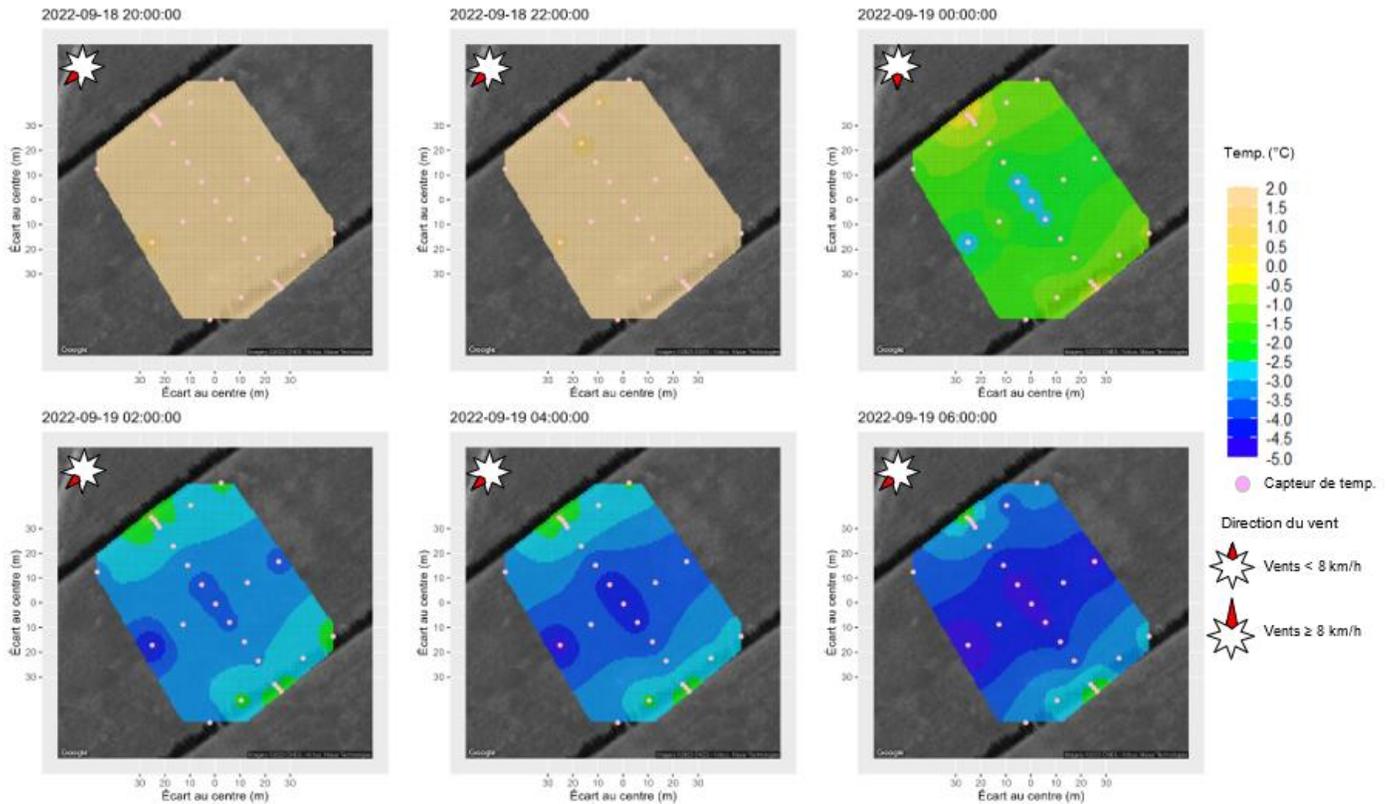


Figure 40. Au site « brise-vent » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits (autres dates pour bâche disponibles en annexe).

Irrigation du sol sec

Pour certains épisodes, la zone protégée est faiblement plus chaude, mais pas de façon uniforme. La Figure 41 montre un exemple pour la nuit du 16 au 17 septembre 2022.

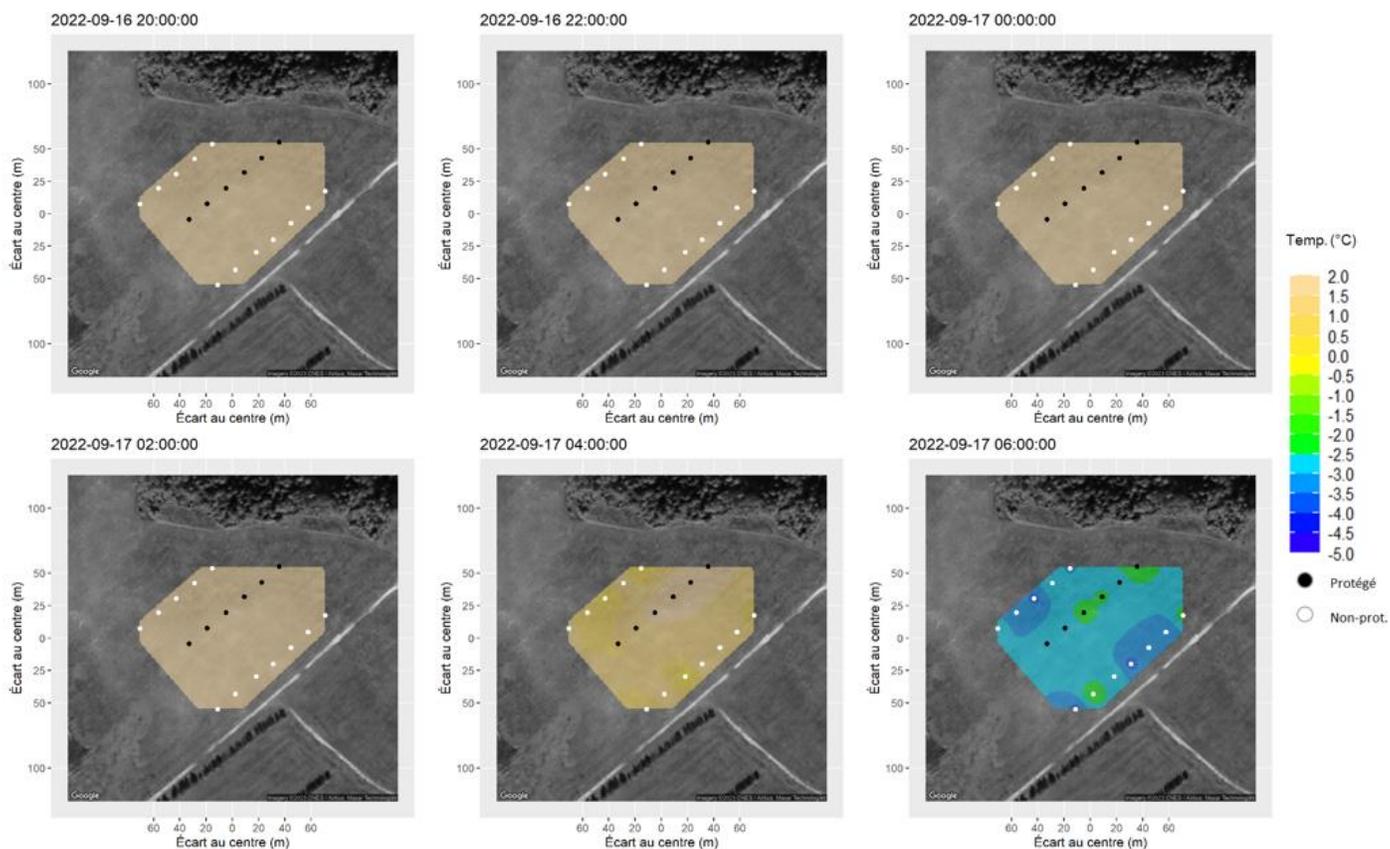


Figure 41. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

Irrigation

L'irrigation a permis un maintien uniforme de la température à près de 0 °C entre les gicleurs. Cet effet est le plus uniforme en comparaison aux autres méthodes. Un exemple est présenté à la Figure 42.

Le vent et la topographie n'ont pas eu d'effets visibles sur la protection, mais la majorité des épisodes étaient caractérisés par des vents faibles.

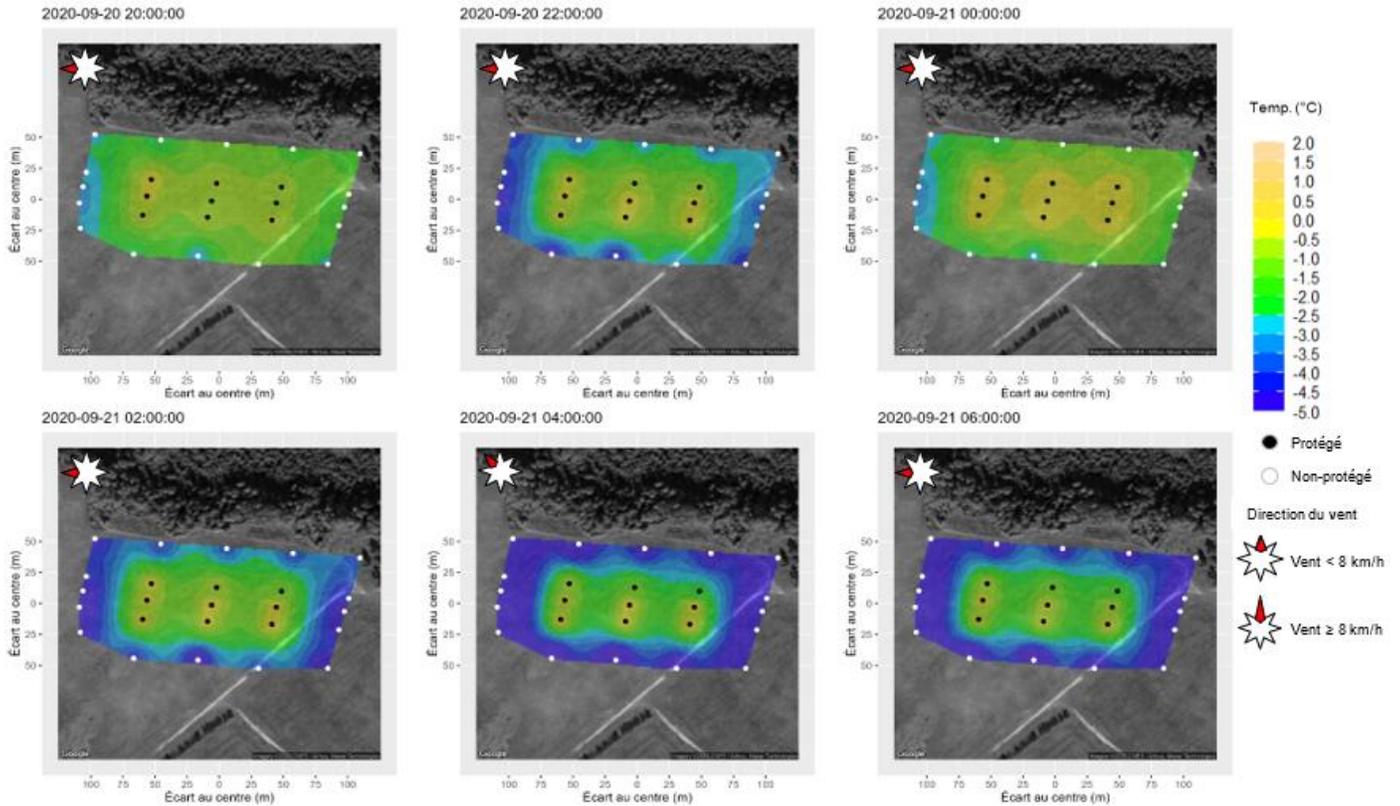


Figure 42. Au site « irrigation » la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

Commentaires généraux

- L'étude des patrons de température indique que l'irrigation durant le gel est la méthode ayant le plus d'impact dans sa zone d'influence.
- L'apport d'air chaud de la machine à vent est remarquable, mais la zone « bien protégée » change de place sur le site d'un épisode à l'autre. Avec une analyse visuelle des cartes thermiques et topographiques, il est difficile d'identifier si le vent ou le sens de la pente ont eu un effet.
- Les brise-vent ont apporté un réchauffement naturel, bien qu'il ne soit pas aussi important que celui de l'irrigation durant le gel, la machine à vent ou la bâche. Ce réchauffement est plus fort près des brise-vent, mais suit un gradient perpendiculaire aux brise-vent qui n'est pas uniforme d'une nuit à l'autre ni d'un site à l'autre.
- Des effets de bords sont présents à l'approche des boisés et des brise-vent par une augmentation ou une diminution de la température.
- Les zones plus basses de la bleuétière, où il y a des obstacles à l'écoulement des masses d'air froid, sont plus susceptibles aux températures plus froides.

Par exemple, les sites 2020 « irrigation du sol sec » et « irrigation », qui étaient situés au bas d'une dépression et bordés par un boisé en aval, étaient propices à l'accumulation d'air froid. La Figure 43 montre bien la topographie autour des sites « irrigation » et « irrigation sol sec » (voisins l'un de l'autre) et l'emplacement du boisé, soit en aval de la pente bordant ces sites.

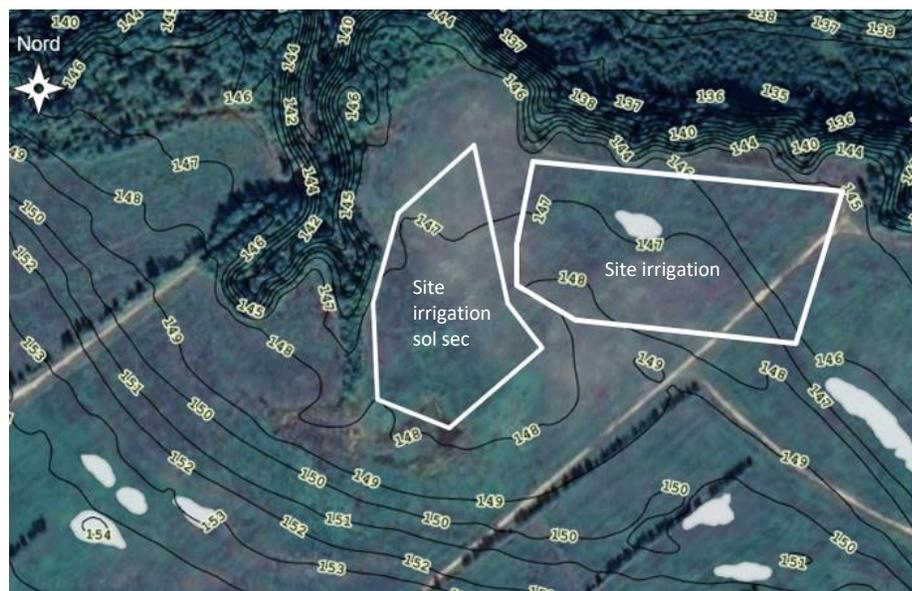


Figure 43. Aux sites 2020 « irrigation du sol sec » et « irrigation », courbes de niveau (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.

En 2020, les températures de ces sites étaient généralement plus froides que celles mesurées aux autres sites. Par exemple en 2020, pour la nuit du 20 au 21 septembre, les minimums atteints en zones non protégées étaient de 1 à 2 °C plus froids que les zones non protégées des 3 autres sites (bâche, brise-vent, machine à vent).

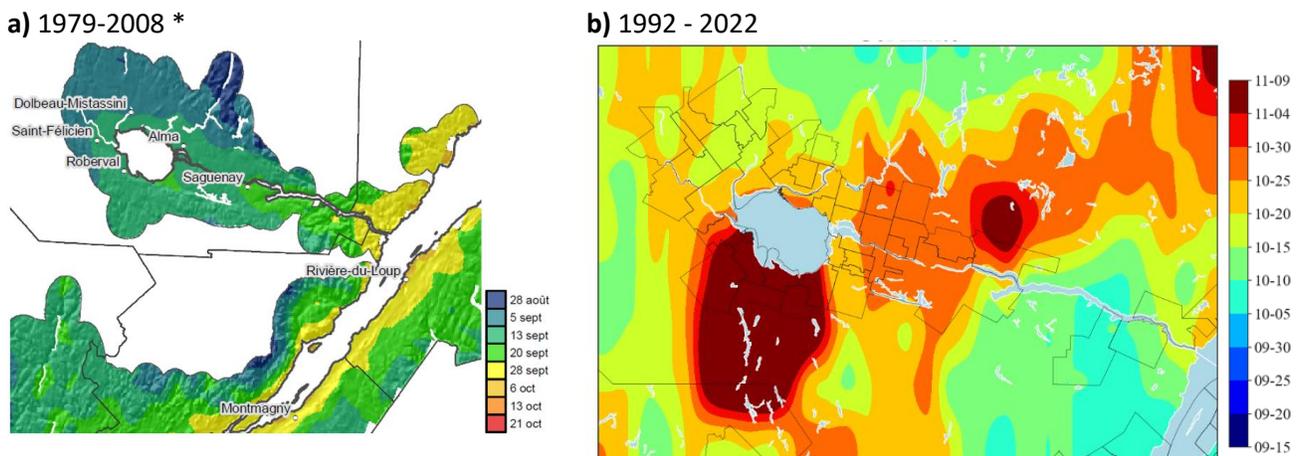
Selon les tableaux récapitulatifs présentés à la section 4.1.5.1, les minimums en zones non protégées atteints pour cette nuit étaient :

- Irrigation sol sec : -7,7 °C
- Irrigation : -6,7 °C
- Bâche : -5,2 °C
- Brise-vent : -5,9 °C
- Machine à vent : -5,9 °C

4.1.5.4 Récurrences climatiques des gels au Saguenay-Lac-Saint-Jean

La Figure 44 permet de comparer visuellement la date moyenne du premier gel au sol (seuil 0 °C) de l'Atlas agroclimatique du Québec (Agrométéo Québec, 2022) à la date de premier gel à la surface du couvert végétal (température de la surface modélisée à partir d'ERA5). La carte de l'Atlas agit comme référence climatique pour l'agrométéorologie au Québec. Cependant, les données utilisées datent de 1979 à 2008 pour des gels sous 0 °C.

En comparant les deux ensembles de données (soit Figure 44 a vs Figure 44 b), les premiers gels sont signalés beaucoup plus tard dans les données d'ERA5 que dans l'Atlas agroclimatique. Selon la réanalyse d'ERA5, le gel arrive en moyenne deux à trois semaines plus tard autour du Lac-Saint-Jean. La carte d'ERA5 produit une analyse plus détaillée des gels, avec une étendue chaude au sud du Lac-Saint-Jean qui se démarque du reste. Entre la partie la plus chaude du Lac-Saint-Jean (représentée par la couleur rouge) et la partie la plus froide (représentée par la couleur orange), il y a un écart de 15 jours.



*Figure a) adaptée de Agrométéo Québec (2022).

Figure 44. Date moyenne du premier gel automnal (seuil 0 °C) selon a) l'Atlas agroclimatique (gel à 2 m, Agrométéo Québec, 2022) b) et selon la réanalyse d'ERA5 (gel selon la température de surface *skin temperature*). Les premiers gels arrivent dans les zones bleutées.

Dates moyennes de premiers gels

La date moyenne où survient le premier gel, pour un type donné et pour la période comprise entre 1992 et 2022, est présentée à la Figure 45 à l'aide de couleurs. Il est à noter que la légende s'arrête au 9 novembre (11-09), mais certains types de gels, comme l'advection, vont arriver plus tard. En moyenne, les gels faibles ont tendance à arriver en premier (5-25 octobre), suivis des gels blancs (15-20 novembre) et finalement les noirs qui vont surtout être après le mois d'octobre. Les premiers gels mixtes ont lieu entre le 10 et le 25 octobre et les premiers gels advection arrivent plus tard que le 10 novembre. Comme mentionné à la section précédente, la présence d'une zone plus chaude au sud du Lac-Saint-Jean suit un gradient nord-sud. Cette zone plus chaude subit ses premiers gels en moyenne de 10 à 15 jours plus tard, particulièrement avec les gels faibles et de type radiatif (blanc et noir). Les gels advection sont possiblement plus tardifs que les autres à cause des mouvements de systèmes dépressionnaires auxquels s'associent des déplacements de masses d'air chaudes et froides. Ces systèmes sont d'ailleurs plus fréquents durant l'hiver.

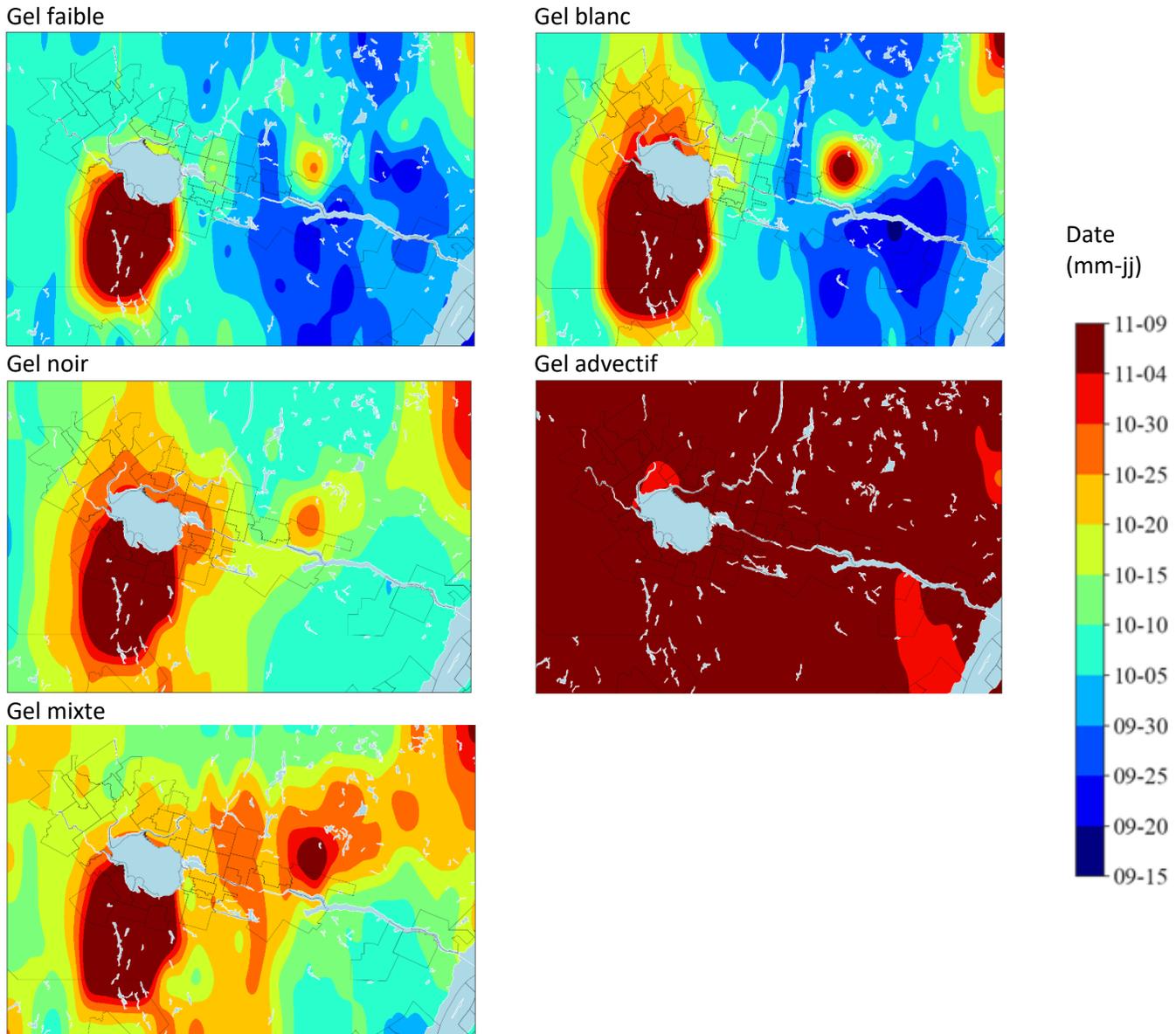


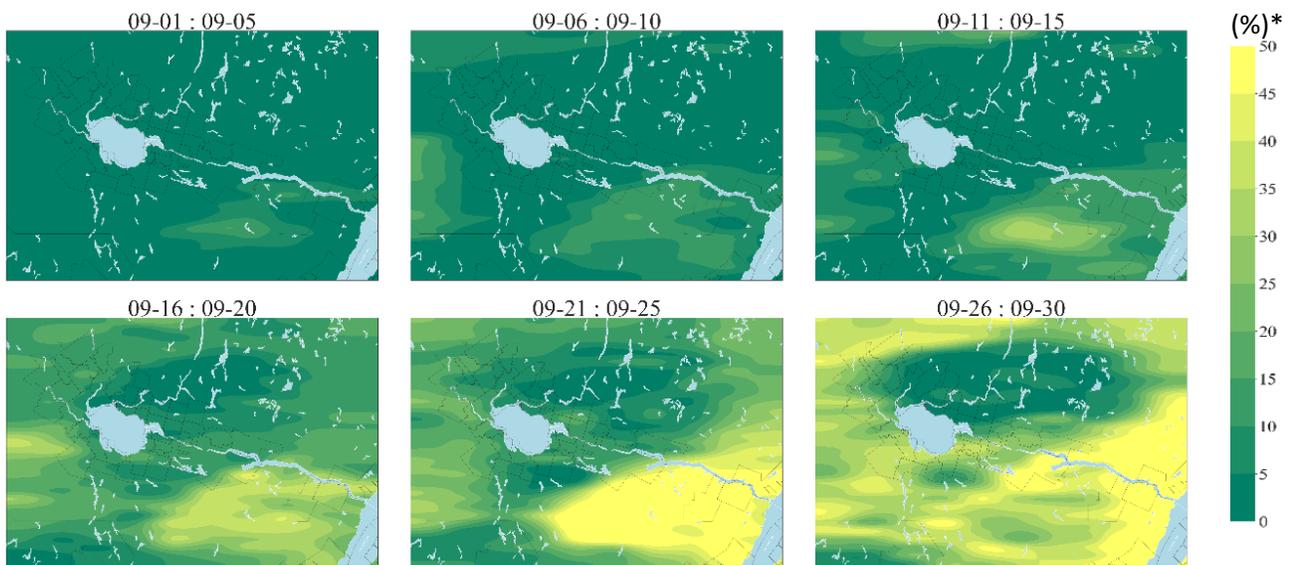
Figure 45. Dates moyennes de premier gel selon la réanalyse d'ERA5 pour la période 1992 - 2022, et selon les types de gel.

Nombre de gels cumulatifs durant le mois de septembre

Le mois de septembre a été segmenté en six périodes et chacune d'elles fait l'objet d'un graphique où figure la date moyenne des premiers gels de type faible, blanc, noir, mixte et advectif, respectivement de la Figure 46 à la Figure 50). Ces graphiques montrent la proportion du nombre d'années où il y a eu au moins une occurrence de gel sur 30 ans selon le type de gel. Représenter les gels de cette façon permet d'identifier des périodes de récurrence en intervalles, et ainsi, déterminer si certaines périodes de septembre sont plus ou moins à risque. À noter que les couleurs jaunes (plus pâle) représentent les secteurs où il y a plus d'occurrences de gel sur 30 ans, autrement dit, les secteurs plus froids.

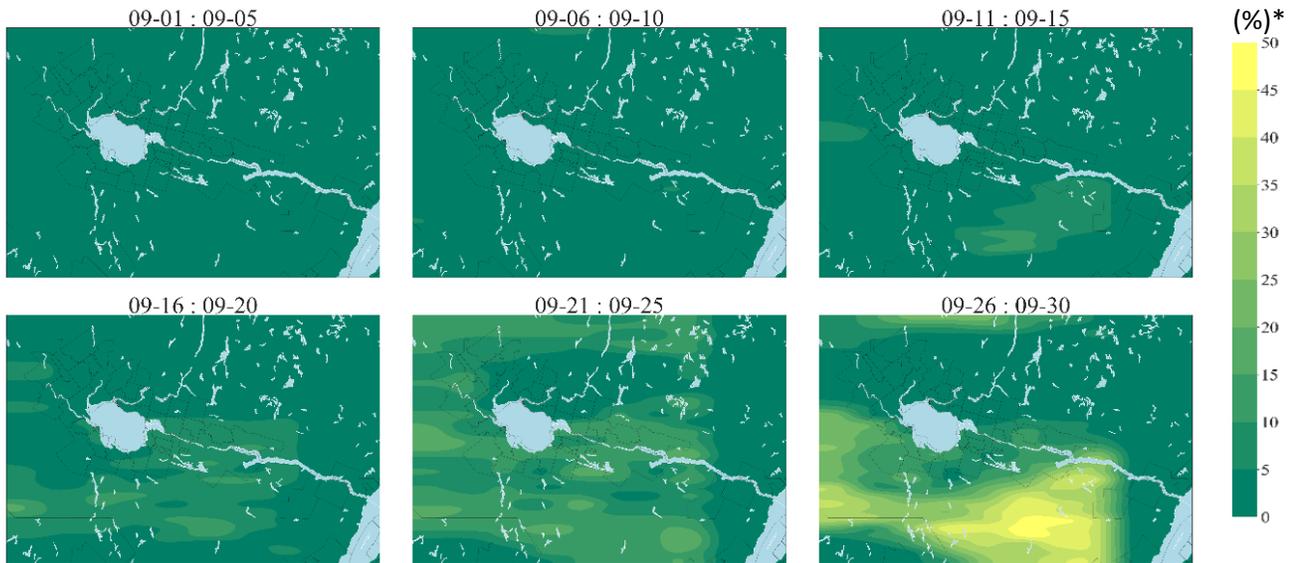
Pour plus de clarté, voici quelques mises en situation. Pour un type de gel (ex. : faible) et pour un seul intervalle de date (ex. : 09-26 au 09-30), si une coordonnée a une valeur de 20 %, cela signifie que cette coordonnée a subi à six reprises au moins un événement de gel par an pour cet intervalle de date, sur trente ans ($6/30 = 20\%$). Si pour une année particulière il y a eu plus d'un gel dans cet intervalle, cela est considéré comme une seule occurrence. Par exemple, si en 2010, il y a eu trois gels (ex. : les 26, 27 et 29 septembre), cela compte pour une seule occurrence dans le calcul du pourcentage, car on compte les fois où il y a eu au moins une occurrence de gel sur 30 ans et par type de gel.

Aucun gel n'a été prédit par cette réanalyse entre le 1^{er} et 5 septembre. Jusqu'au 25 septembre, peu d'épisodes de gel ont été prédits autour du Lac-Saint-Jean avec des maximums de trois ou quatre gels au total. Ce n'est qu'à partir de l'intervalle 25-30 septembre qu'une augmentation importante des occurrences de gel est constatée. Dans le sud du S.-L.-St-J., certaines zones ont des récurrences de gel de 40 %. Encore une fois, un gradient se constate entre le nord et sud du Lac-Saint-Jean. Toutefois, au nord, il n'y a pratiquement aucun gel faible dans les intervalles présentés. Cela peut paraître un peu contradictoire avec ce qui a été présenté à la Figure 45, car au nord, les gels devraient arriver plus tôt qu'au sud. Une explication possible, qui n'a jamais été vérifiée, est que la partie sud du S.-L.-St-J. est beaucoup plus variable dans ces périodes de gel que la partie nord, qui serait plutôt stable au mois d'octobre. Le nombre d'occurrences des autres types de gel est petit, allant de 0 à 10 % jusqu'à la fin du mois de septembre pour les zones autour du Lac.



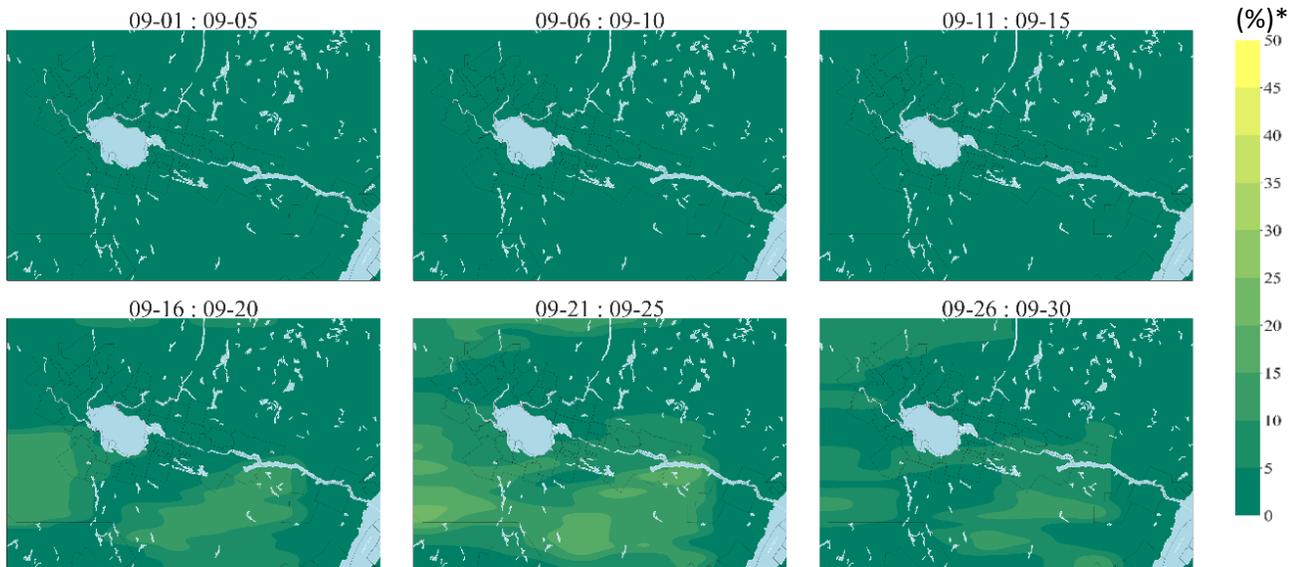
* Pourcentage des années où il y a eu au moins une occurrence de gel faible (par intervalle de date).

Figure 46. Dates moyennes des premiers gels de type faible pour la période 1992 - 2022 selon la réanalyse d'ERA5.



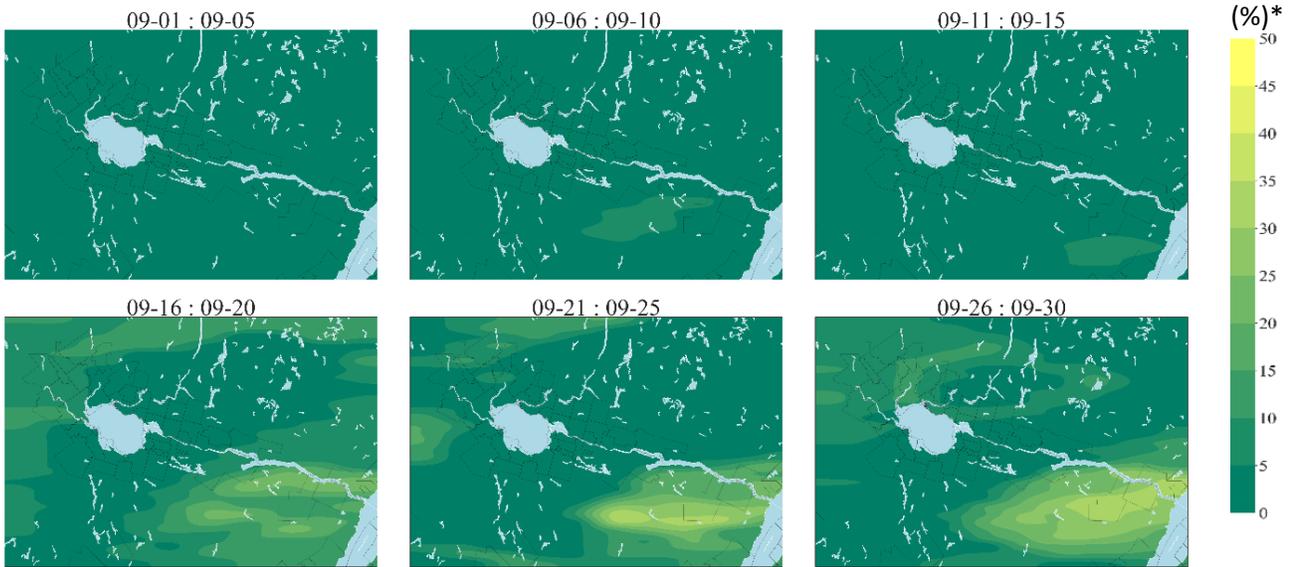
* Pourcentage des années où il y a eu au moins une occurrence de gel blanc (par intervalle de date).

Figure 47. Dates moyennes des premiers gels de type blanc pour la période 1992 - 2022 selon la réanalyse d'ERA5.



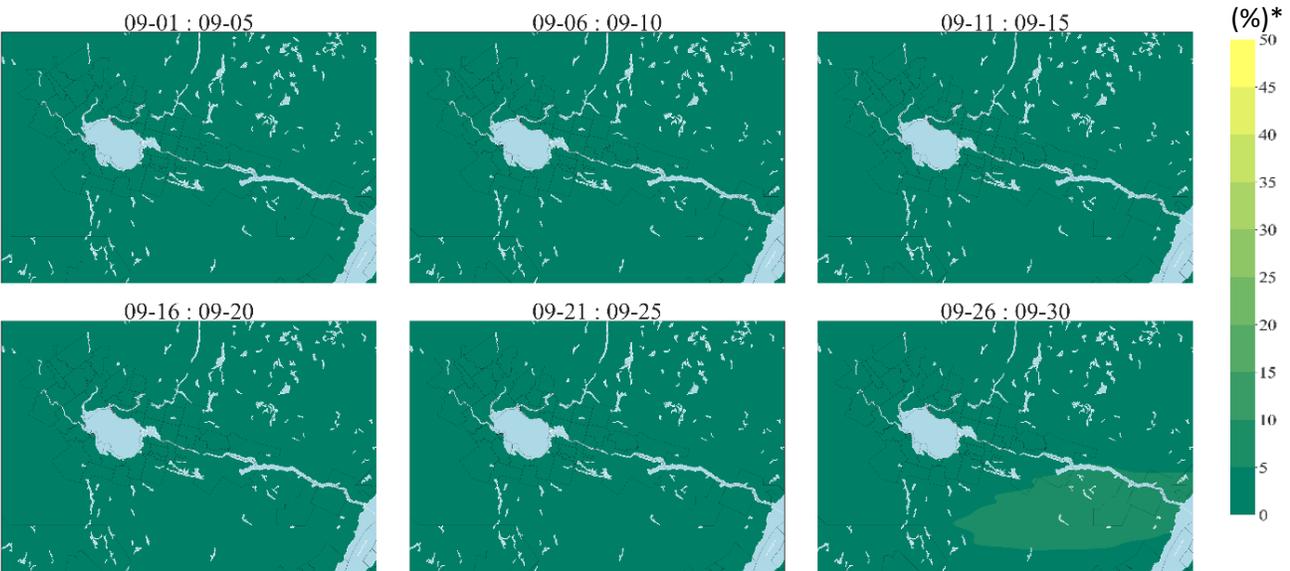
* Pourcentage des années où il y a eu au moins une occurrence de gel noir (par intervalle de date).

Figure 48. Dates moyennes des premiers gels de type noir pour la période 1992 - 2022 selon la réanalyse d'ERA5.



* Pourcentage des années où il y a eu au moins une occurrence de gel mixte (par intervalle de date).

Figure 49. Dates moyennes des premiers gels de type mixte pour la période 1992 - 2022 selon la réanalyse d'ERA5.



* Pourcentage des années où il y a eu au moins une occurrence de gel advectif (par intervalle de date).

Figure 50. Dates moyennes des premiers gels de type advectif pour la période 1992 - 2022 selon la réanalyse d'ERA5.

Validité des nombres de gels modélisés

De la Figure 46 à la Figure 50 est illustrée la récurrence des différents types de gel. Avec la réanalyse d'ERA5, les gels débutent vers le 10-20 octobre au S.-L.-St-J. (Figure 50), tandis qu'avec l'Atlas agroclimatique, ils débutent vers le 13-19 septembre (Figure 44). Bien qu'un décalage fût attendu (expliqué dans la méthodologie), il est toutefois prononcé et les résultats doivent être interprétés avec prudence. Néanmoins, les tendances spatiales se ressemblent et pourraient aider la prise de décision (par exemple, le gel arrive plus tard près du Lac-Saint-Jean qu'en périphérie de ce dernier).

Des analyses effectuées sur le cycle diurne de la température de l'air à 2 m du sol avec la réanalyse d'ERA5 semblent indiquer que son amplitude est plus faible que ce qui est observé aux stations météorologiques. Cela ferait en sorte que les températures minimales atteintes durant la nuit sont plus élevées que ce qui est censé être (Ouranos, 2023).

Le nombre de gels prédits par la réanalyse semble relativement petit par rapport à ce qui est observé en réalité (données de station météo et constats durant les 3 années d'essais). D'ailleurs, durant le projet, des gels ont été observés à la première semaine de septembre. Il est possible de comparer les données d'ERA5 avec les données de la station d'Environnement Canada à Normandin (Tableau 12). Les résultats montrent que la station météo mesure des gels plus tôt que ce qui est prévu par ERA5. Cela signifie que la réanalyse a tendance à sous-estimer les épisodes de gel, et ce, malgré la correction appliquée. Ce comportement était attendu par la réanalyse, tel qu'expliqué à la méthodologie 3.2.7.1.

Tableau 12. Nombre d'années pour lesquelles chaque type de gel a eu au moins une occurrence à la station d'Environnement Canada (Normandin) pour la période 2011 à 2022 et à 2 m selon un intervalle de dates donnés.

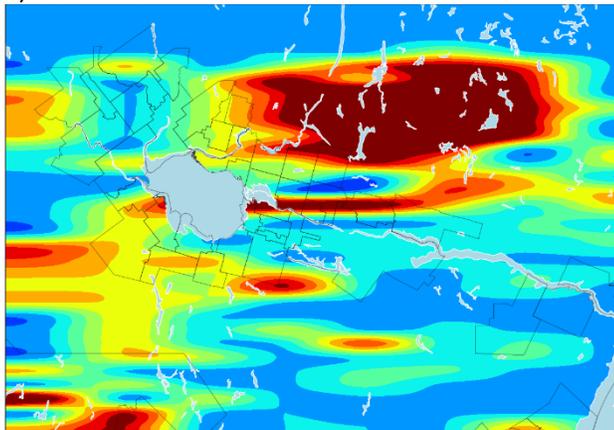
Intervalles de dates	Types de gel				
	Faible	Radiatif		Mixte	Advection
		Blanc	Noir		
1 au 5 sept.	0	0	0	0	0
6 au 10 sept.	1	1	0	0	0
11 au 15 sept.	3	0	0	0	0
16 au 20 sept.	4	2	0	1	0
21 au 25 sept.	4	2	2	1	0
26 au 30 sept.	1	0	0	0	0

Épisodes de gel par année (2020 à 2021)

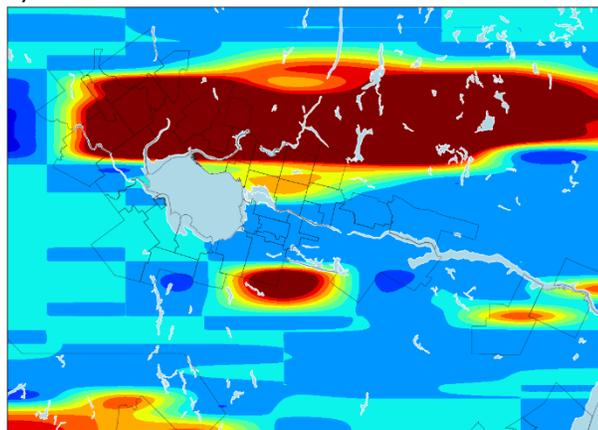
Les dates prédites des premiers gels 2020-2022, selon les types de gel, sont présentées de La Figure 51 à la Figure 53.

2020

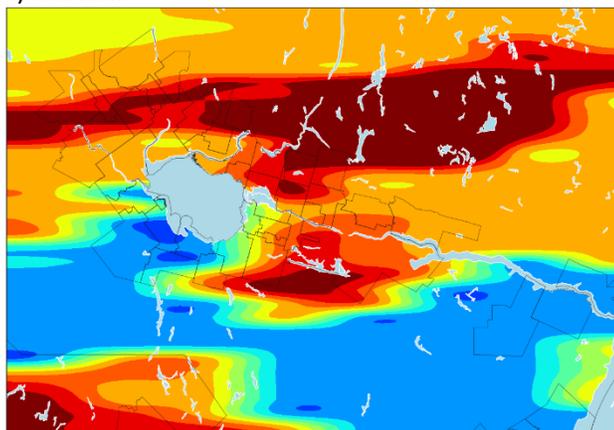
a) Gel faible



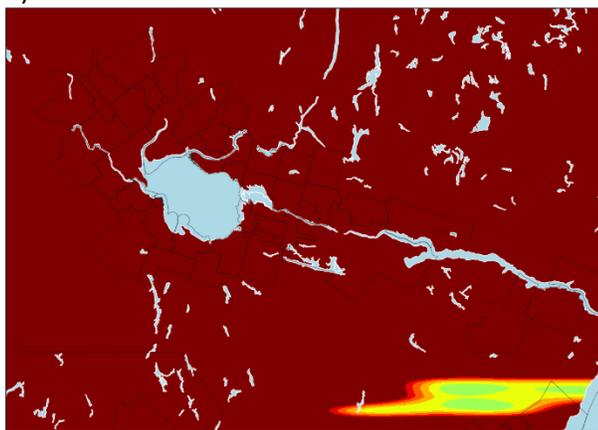
b) Gel blanc



c) Gel noir



d) Gel advectif



e) Gel mixte

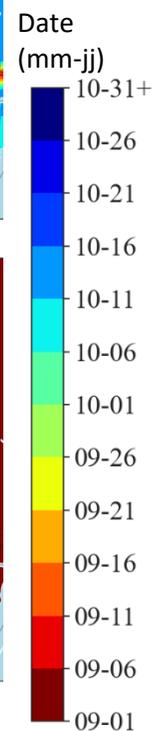
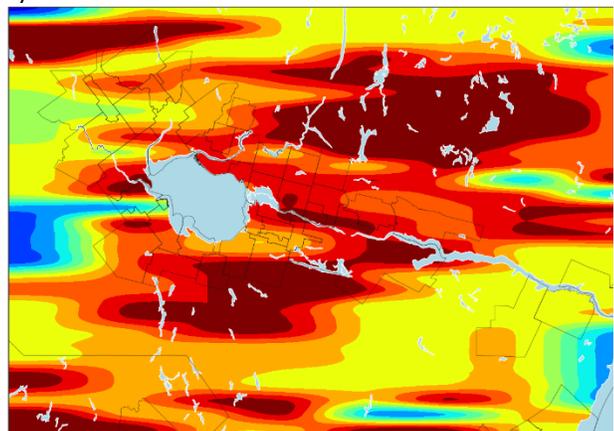
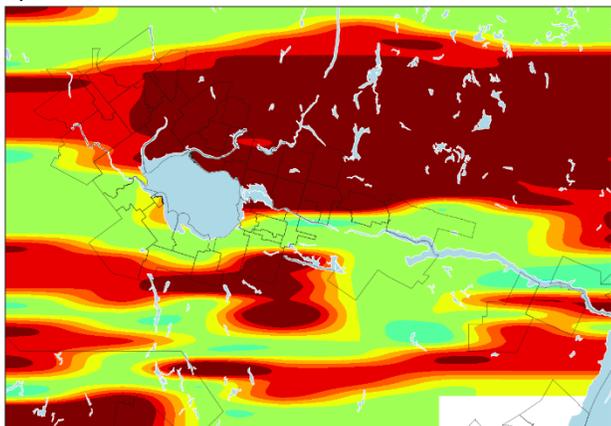


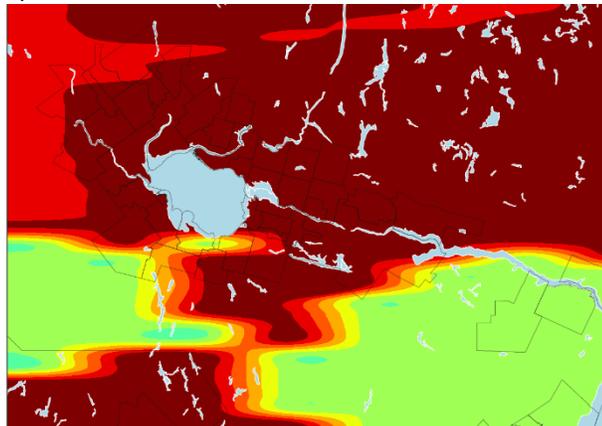
Figure 51. Dates des premiers gels prédits pour 2020 (réanalyse d'ERA5). La dernière couleur (10-31+) contient toutes les dates de premiers gels du mois de novembre.

2021

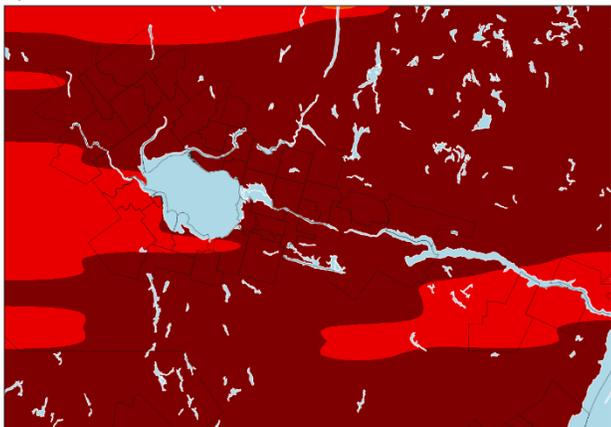
a) Gel faible



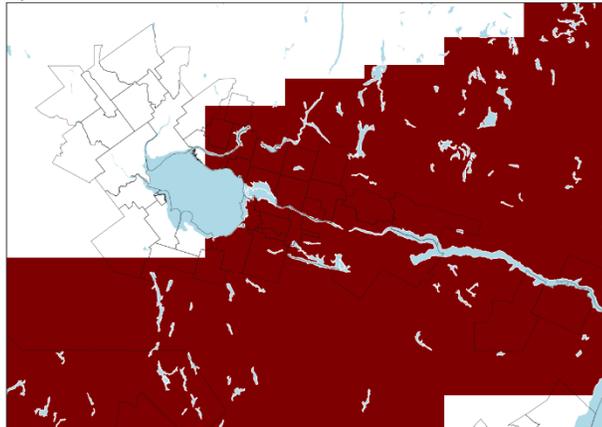
b) Gel blanc



c) Gel noir



d) Gel advectif



e) Gel mixte

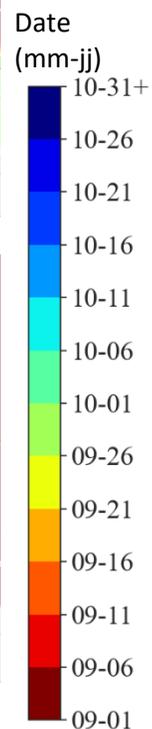
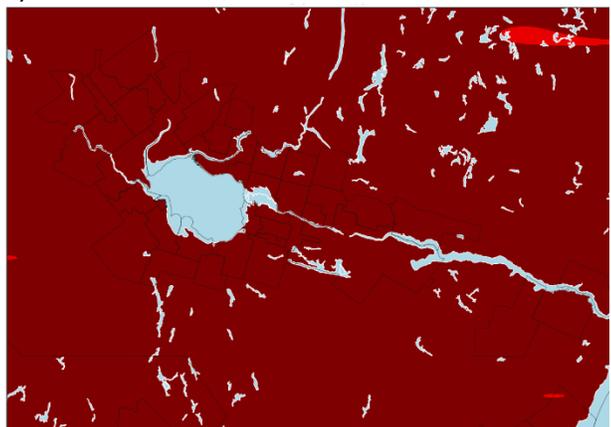
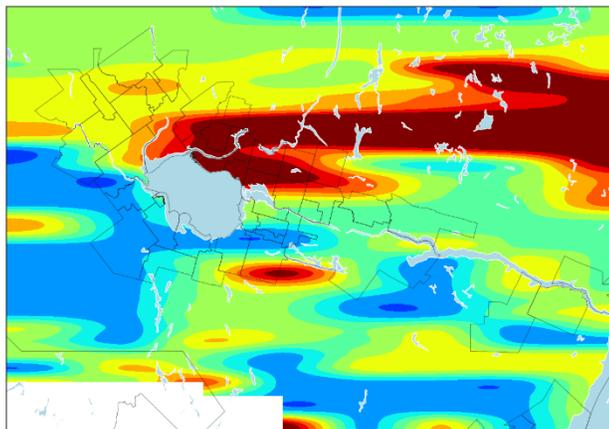


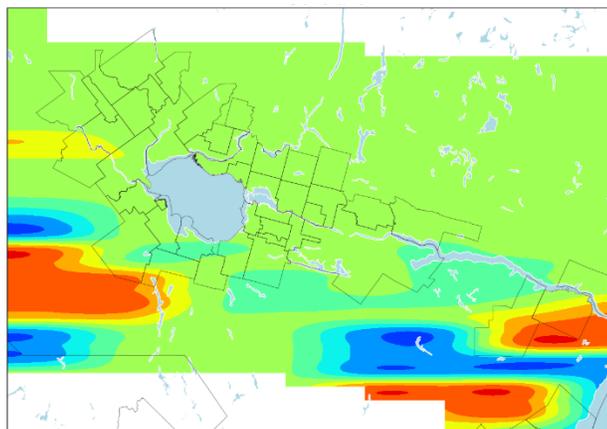
Figure 52. Dates de premiers gels prédits pour 2021 (réanalyse d'ERA5). La dernière couleur (10-31+) contient toutes les dates de premiers gels du mois de novembre. Les premiers gels ayant eu lieu après le 30 novembre sont en blanc.

2022

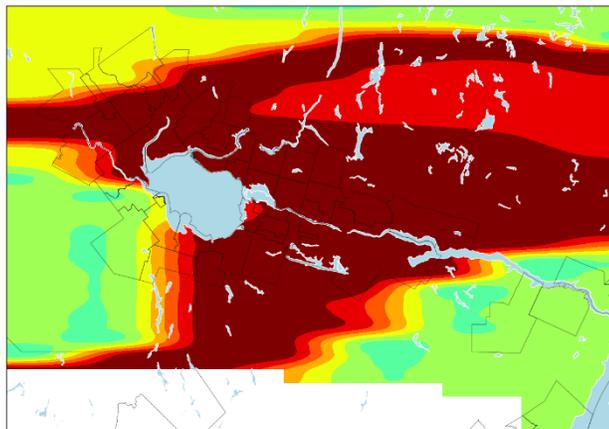
Gel faible



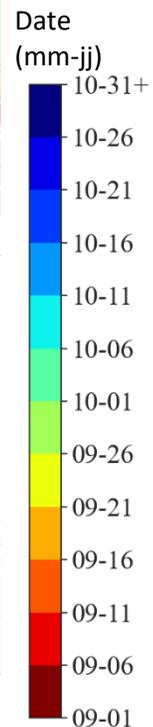
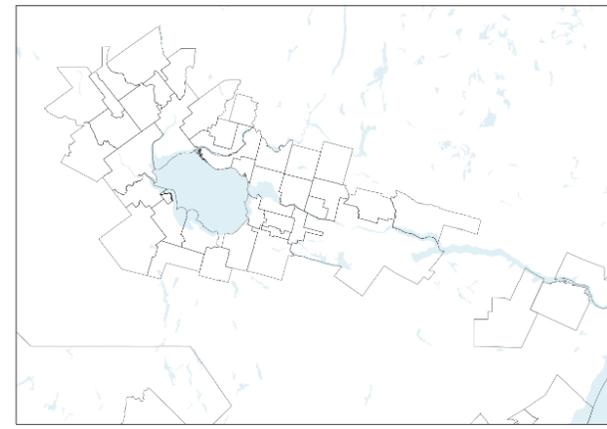
Gel blanc



Gel noir



Gel advectif



e) Gel mixte

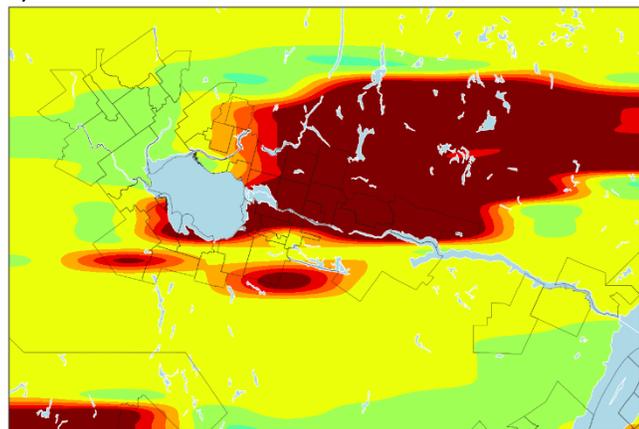


Figure 53. Dates de premiers gels prédits pour 2022 (réanalyse d'ERA5). La dernière couleur (10-31+) contient toutes les dates de premiers gels du mois de novembre. Les premiers gels ayant eu lieu après le 30 novembre sont en blanc.

L'année 2021 n'a subi aucun gel advectif ou mixte avant le 31 octobre. En 2020, les premiers gels faibles ont été observés autour du Lac-Saint-Jean du 16 au 21 septembre. Des gels plus tardifs ont été observés au nord, allant jusqu'au 21 octobre. Des gels blancs et noirs ont été observés au sud du Lac-Saint-Jean du 16 au 26 septembre. De premiers épisodes de gels noirs sont arrivés particulièrement tôt au sud-ouest du Lac-Saint-Jean, alors que le reste du S.-L.-St-J. a connu ses premiers gels vers la fin du mois d'octobre et plus tard. D'ailleurs, dans la municipalité de Sainte-Prime, un premier gel noir est arrivé avant un premier gel faible ou blanc entre le 11 et 16 septembre. Les premiers gels mixtes suivent un patron similaire aux gels radiatifs. Les dates de premiers gels sont autour du 16 au 26 septembre dans les municipalités de Saint-Félicien et de la Dorée ce qui est remarquablement plus tôt que les autres régions qui ont leurs premiers gels en octobre.

En 2021, les premiers gels, peu importe le type, sont arrivés au mois d'octobre et plus tard. Les résultats pour 2022 sont similaires à 2021, car aucun premier gel autour du Lac-Saint-Jean n'a été identifié avant le 1^{er} octobre. Il est néanmoins intéressant de noter que le patron des gels faibles ressemble à ce qui a été observé en 2020 dans le sens où les premiers gels au nord du Lac-Saint-Jean arrivent beaucoup plus tard dans la saison qu'ailleurs.

Sur les 11 années de données à la station, des épisodes de gels faibles et gels blancs ont été observés beaucoup plus tôt que le résultat de la réanalyse d'ERA5. Il faut alors reconnaître que le produit présenté ici n'est pas parfait et que certaines erreurs doivent être attendues. Il est aussi possible qu'une autre station que celle de Normandin puisse avoir recensé des gels beaucoup plus tard. Il y a beaucoup de variabilité microclimatique autour du Lac-Saint-Jean, notamment due à la présence de l'eau et à la topographie, ce qui fait difficile de se fier à un seul produit. Cela dit, bien qu'en valeur absolue le nombre de gels risque de ne pas être représentatif de la réalité, des informations intéressantes peuvent être extraites des distributions spatiales et tendances des événements de gel.

5 Retombées pour le secteur

Le secteur du bleuet sauvage cultivé dispose maintenant d'un rendu exhaustif de comparaisons de méthodes de protection contre le gel. Une telle comparaison qui s'appuie sur des essais en bleuetières de méthode de protection contre le gel n'avait jamais été faite avant. Le nombre de méthodes de protection est somme toute restreint et n'est pas appelé à augmenter prochainement. Par conséquent, les résultats de ce projet pilote auront une portée à long terme.

Certains résultats pourront servir à approfondir les connaissances en ce qui a trait à la protection contre le gel du bleuet sauvage au Québec. Tandis que la synthèse du projet (Boivin et coll., 2023), plus concise et pratique, sera un outil directement utile aux producteurs et intervenants désirant avoir un coup d'œil rapide sur ce sujet. Les conclusions de ce projet peuvent être utilisées pour la protection des fruits contre le gel, et certains éléments de conclusions sont également applicables pour la protection des fleurs du bleuet sauvage contre le gel.

D'ailleurs cette étude a permis de faire en parallèle un projet pilote sur la protection contre le gel des fleurs au printemps 2021 avec la machine à vent (Anderson et coll., 2022). Comme le printemps 2021 a été marqué par synchronisme fleur-gel, les résultats de cette étude sont directement utiles au secteur pour ce qui est du gel printanier.

6 Suivi des indicateurs de résultats

Les indicateurs de résultats de ce projet de recherche sont au nombre de quatre et ces derniers sont discutés ci-dessous.

Démonstration du niveau d'efficacité des méthodes de protection contre le gel comparativement à l'absence de protection

La démonstration du niveau d'efficacité des méthodes de protection contre le gel comparativement à l'absence de protection a été faite. Un total de 183 suivis nocturnes (températures au niveau des fruits et autres paramètres météo) sont présentés et analysés dans ce rapport. Toutes les méthodes de protections ont eu un effet de protection mesurable (variant de très faible à 100 % efficace).

Une analyse multiapproche a été utilisée pour analyser l'effet de chaque méthode sur la protection contre le gel : outils visuels (graphiques et tableaux de moyennes des conditions météo et au niveau des fruits, cartes d'interpolation spatiales), analyse statistique (sur la fermeté, les températures, et établissement d'une relation entre la fermeté et les degrés heure gel), et analyses des récurrences climatiques (dates de premier gel à la hauteur des fruits) au Saguenay–Lac-Saint-Jean.

Nombre de participants aux événements de démonstration des différentes méthodes de protection contre le gel

Plus de 550 personnes (détail à la section 3.3) ont été rejointes via les différentes activités de diffusions et transferts qui comprennent : 1) des présentations ciblées aux producteurs partenaires; 2) une journée de démonstration au champ ouverte à tous les intervenants du secteur; 3) un cahier synthèse de la journée de démonstration envoyée par courriel aux participants; 4) un webinaire en ligne; 5) un rapport final; et un guide explicatif ayant trait à la protection contre le gel du bleuet sauvage cultivé destiné au marché frais.

Nombre d'entreprises démontrant de l'intérêt pour l'adoption de l'une des méthodes de protection contre le gel présenté

Le 20 septembre 2022, 50 personnes qui se sont déplacées pour une journée complète de démonstration des méthodes de protection contre le gel au champ. Les gens de milieux variés étaient présents.

Vu l'absence de sondage à la suite des activités de diffusion, le nombre précis d'entreprises rejointes est difficile à calculer.

Prolonger la récolte jusqu'au 1^{er} octobre

Le but du projet était de déployer les méthodes de protection au moins 1 fois la première année, au moins 2 fois la 2^e année et jusqu'au 1^{er} octobre la dernière année. La performance de chaque méthode (maintenir la qualité des fruits) dépend des conditions météo qui ont cours, car elles n'offrent pas toutes le même gain de température.

Ensuite en 2022, des défaillances techniques ont empêché l'irrigation et la machine à vent de protéger les fruits contre le gel jusqu'à la date visée du 1^{er} octobre (section 4.1.4 du rapport). Chaque méthode comprend des risques inhérents aux forces et faiblesses internes et externes à l'entreprise agricole. L'entreprise doit choisir une méthode de protection qui minimise les risques pour son contexte de production. La méthode SWOT a été proposée pour orienter ce type de démarche et une synthèse des éléments à considérer est disponible dans la synthèse du projet (Anderson et coll., 2023).

7 Conclusion

- La bâche, le brise-vent et l'irrigation ont eu un effet protecteur significatif qui a permis de maintenir la fermeté du bleuët, tandis que la machine à vent et l'irrigation du sol sec n'ont pas eu cet effet.
- Pour la machine à vent, même si l'effet sur la température était significativement plus élevé, cela ne s'est pas reflété ni sur le maintien de la fermeté des fruits ni sur l'accumulation de gel près de la machine. L'effet de la machine est mitigé. L'analyse visuelle des cartes thermiques a montré que la zone protégée n'a pas la même étendue d'une nuit à l'autre (variabilité spatiale) et cela a eu un impact sur sa performance globale.
- La bâche a causé un retard de dormance visible aux plants protégés. Une fauche effectuée avant la période de dormance peut nuire au développement du bleuëtier à la saison subséquente. Il est donc recommandé de porter une attention particulière au stade des bleuëtiers avant de faucher, particulièrement avec cette méthode. Une taille au printemps pourrait permettre de réduire les risques. Un décalage de dormance n'a pas été observé avec les autres méthodes.
- Même si l'aménagement de « sorties d'air » ne faisait pas partie des méthodes de protection évaluées dans ce projet, la carte thermique qui a été produite sur une grande superficie a permis de repérer des zones d'accumulation d'air froid dans certaines zones basses bordées d'obstacles à l'écoulement de l'air. L'aménagement de « sorties d'air » pour évacuer l'air froid permettrait de diminuer la vulnérabilité au gel de la bleuëtière. Un document de référence québécois fournit des recommandations : Bellemare et coll. (2017). Des relevés de terrain LIDAR existent au Québec et peuvent être utilisés pour appuyer une telle démarche.
- Des brise-vent matures offrent une protection d'environ 1,5 à 2°C, principalement dans les 10^{ers} m (7 m de hauteur et 30 % de porosité). Pour une bleuëtière ayant des brise-vent espacés aux 60 m, cela représente une protection pour 33 % de la superficie, à condition qu'il s'agisse d'un gel de faible intensité et de type radiatif (vents environ < 5 km/h). Une stratégie de récolte basée sur la distance au brise-vent (récolter les zones à plus de 10 m des brise-vent en premier) pourrait permettre de réduire les risques de pertes de rendement dues aux gels précoces de faibles intensités.
- Bien que l'irrigation soit la méthode la plus performante pour maintenir les fruits sous le seuil de congélation, des mesures de rendements n'étaient pas visées dans cette étude. Or, l'accumulation de glace sur les fruits pourrait causer un stress mécanique, accélérer l'abscission et mener à des pertes de rendement. Plus de recherche devrait être faite pour mesurer ce risque.
- Bien connaître les zones sensibles sur une bleuëtière peut aussi orienter une stratégie de récolte où les zones sensibles sont récoltées en premier.
- Compte tenu de la variabilité spatiale sur les bleuëtières et les différences entre les conditions météo à grandes (prévisions) et à petites échelles (par secteur sur la ferme selon les variations microlocales décrites à la section « 3.2.4.1 »), le suivi des températures à la hauteur des fruits, et en hauteur dans le cas de l'utilisation de la machine à vent, est nécessaire pour bien réussir une protection contre le gel : durée et moment de démarrage des protections, choix des méthodes, et leurs emplacements sur la bleuëtière.
- Un modèle qui prédit assez bien la fermeté à partir du nombre d'heures passées sous -2 °C à la hauteur des fruits a été développé. Ce modèle pourrait permettre de prédire assez simplement, à partir de prévision météo, la date à partir de laquelle une récolte de bleuët sauvage visée pour le marché frais serait perdue. Plus de travaux sont toutefois nécessaires pour bien calibrer un tel modèle. Par exemple, il faudrait que le seuil, au-delà duquel un bleuët sauvage n'est plus éligible au marché frais soit connu.
- Une forte relation existe entre le temps, cumulatif, où le bleuët est exposé à une température de -2 °C et la fermeté de celui-ci. L'identification du seuil critique sur le plan du nombre d'heures d'accumulation de gel pourrait permettre de prédire la date où la récolte d'un fruit de qualité n'est plus possible, en fonction des conditions météo et installations du producteur. Ce type de prédiction serait facile à implémenter dans un outil en ligne existant (ex. Agrométéo Québec).
- Des données de réanalyses de ERA5 des 30 dernières années, pour la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean, ont permis la production de cartes sur les types de gel. La distribution géographique de ces gels et la récurrence de la première date de gel automnal ont été étudiées.

- La réanalyse d'ÉRA5 n'a pas conclu à ce que des gels surviennent au mois d'août. Ce biais découlerait d'une surestimation du modèle des températures diurnes, ce qui a déjà été observé par d'autres intervenants du milieu. En surestimant la température minimale de l'air, les données issues de la réanalyse n'ont pas permis de capturer tous les épisodes de gels ayant eu lieu. Toutefois, les tendances générales, comme la distribution géographique des zones plus chaudes ou plus froides, ainsi que les tendances sur les secteurs qui risquent de recevoir un gel automnal en premier devraient être similaires.
- Les types de gel radiatifs sont plus fréquents en septembre et en octobre que les gels advectifs.
- Les gels radiatifs arrivent 2 à 3 semaines plus tard au sud du Lac qu'ailleurs autour de celui-ci.
- Les tendances générales, comme la distribution géographique des zones plus chaudes ou plus froides, ainsi que celles pour les secteurs qui risquent de recevoir un gel automnal sont bonnes, mais les modélisations ont sous-estimé le nombre d'occurrences de gel.
- Les vitesses critiques de vent pour les méthodes qui performant bien en situation de gel « radiatif » (machine à vent, bâche et brise-vent), sont de 4 à 6 km/h. Cette vitesse est inférieure au seuil de vent suggéré par la « Clé diagnostique des risques de gels en fonction des conditions » (MAPAQ, 2014) pour caractériser les types de gels et les relier à un seuil de performance. Des seuils de vents de vitesses inférieures seraient plus appropriés. Les documents de références sur la performance des méthodes de gel devraient être ajustés en ce sens, particulièrement pour le bleuets sauvage cultivé.

8 Références

- Abatzoglou, J. T. 2013. Development of gridded surface meteorological data for ecological applications and modelling. *International Journal of Climatology*, 33(1), 121-131.
- Agrométéo Québec. 2022. Moyenne de la date du premier gel automnal (seuil 0 °C) [En ligne] <https://www.agrometeo.org/index.php/atlas/map/moyenne15/M0/1979-2008/false>, page consultée le 6 janvier 2023.
- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19 (6), 716–723. *Math. Rev.*, 423716.
- 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 bleuët sauvage cultivé pour le marché de la transformation. Rapport final. IRDA. 39 p.
- Argall, J. et G. Chiasson. 1996. Utilisation des brise-vent pour les bleuëtières. Feuillet A.4.0. Ministère de l'Agriculture et de l'Aménagement rural du Nouveau-Brunswick [En ligne] http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/10/agriculture/content/cultures/bleuets_sauvages/brise_vent.html, page consultée le 23 février 2023.
- Babak, O. et C. V. Deutsch. 2009. Statistical approach to inverse distance interpolation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23, 543-553.
- Baranyay, J. A. et R.B. Smith, 1974. Low temperature damage to dwarf mistletoe fruit. *Canadian Journal of Forest Research*, 4(3), 361-365.
- Barriault, E., R. Fonclara, G. Bourgeois, A. Drouin, L. Grenon, A.R. Michaud, D. Plouffe et D. Venneman. 2013. Grille d'évaluation du potentiel viticole.
- Barriault E. et M.-P. Gosselin. 2014. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 2014. Gel printanier et méthodes de protections. Bleuët nain [En ligne] <https://www.agrireseau.net/Rap/documents/b01bn14.pdf>, page consultée le 14 février 2023.
- Barriault É., 2022. Gel printanier et méthodes de protection. Webinaire horticole sur la protection contre le gel. [En ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=trduBH6ZnV8>, page consultée le 14 février 2023.
- Bellemare M., É. Barriault, A. Deslauriers, P.-O. Martel et V. Moreau. 2017. La production du bleuët sauvage dans une perspective de développement durable. Feuillet 3.3 « Le gel printanier et automnal ». 13 p.
- Bhullar, K. S. 2012. Effect of polypropylene covers on frost protection and yield of potato crop. *Journal of Krishi Vigyan*, 1 (1), 18-20.
- Boivin, C., L. Anderson et J. Vallée. 2023. Synthèse du projet - Méthodes de protection contre le gel du bleuët sauvage cultivé - Marché frais. IRDA. 15 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 bleuët nain cultivé dans un contexte de climat variable et en évolution. IRDA. 200 p.
- Brassard, H. 2014. La production du bleuët sauvage dans une perspective de développement durable. Feuillet 6 « La prévention du gel dans les bleuëtières ». 232 p.
- Centre d'études sur les coûts de production en agriculture (CECPA). 2023. Projet pilote sur l'efficacité de méthodes de protection contre le gel des fruits pour le bleuët sauvage cultivé. Analyse économique. 20 p.
- Cline, B. 1998. Blueberry Freeze Damage and Protection Measures. Horticulture Information Leaflets. [En ligne] <https://content.ces.ncsu.edu/blueberry-freeze-damage-and-protection-measures#:~:text=When%20the%20blossoms%20are%20open,F%20will%20result%20in%20damage>, page consultée le 14 février 2023.

- Desjardins, È. C. 2014. Étude sur l'entomofaune et l'irrigation par aspersion dans les bleuetières semi-cultivées. Université du Québec à Montréal.
- Dubois Agrinovation. 2023. Communication personnelle, 24 février 2023.
- Gagnon, S., M.-È. Moreau et V. Moreau. 2014. La production du bleuet sauvage dans une perspective de développement durable. Feuille 9 « La taille de régénération dans les bleuetières ». 232 p.
- Golden Software. 2022. Inverse Distance to a Power. GoldenSoftware. [En ligne] https://surferhelp.goldensoftware.com/griddata/IDD_GRID_DATA_INVERSE_DISTANCE.htm, page consultée le 3 février 2023.
- Guyot, G. 1997. Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes (pp. 505-p). Elsevier Mason SAS.
- Hersbach H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater et J. N. Thépaut. 2020. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146 (730), 1999-2049.
- Heusinkveld, V. W., J. A. van Hooft, B. Schilperoort, P. Baas, P. et B. J. van de Wiel 2020. Towards a physics-based understanding of fruit frost protection using wind machines. Agricultural and Forest Meteorology, 282, 107868.
- Ikani, V. 2022. Analyse des éléments climatiques – environnementaux et leurs influences sur la formation et sur l'intensité du gel radiatif dans un vignoble de Chaudière-Appalaches. 44 p. [En ligne] https://www.agrireseau.net/documents/Document_109728.pdf, page consultée le 28 février 2022.
- Info-Sols. 2023. Saguenay-Lac-Saint-Jean [Application web] www.info-sols.ca, page consultée le 10 mars 2023.
- Kahle D et H. Wickham. 2013. ggmap: Spatial Visualization with ggplot2. The R Journal, 5(1), 144–161. [En ligne] <https://journal.r-project.org/archive/2013-1/kahle-wickham.pdf>.
- Kennedy, S. 2022. Astral (version 3.0) [Logiciel] <https://github.com/sffjunkie/astral>, page consultée le 2 décembre 2022.
- Lepage, M- P. et G. Bourgeois. 2011. Le réseau québécois de stations météorologiques et l'information générée pour le secteur agricole. 15 p. [En ligne] https://www.agrometeo.org/help/le_reseau_quebecois_de_stations_meteo.pdf, page consultée le 17 mars 2023.
- Lindkvist, L., T. Gustavsson et J. Bogren. 2000. A frost assessment method for mountainous areas. Agricultural and forest meteorology, 102(1), 51-67.
- Ministère de l'Agriculture des pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 2023. Direction régionale du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Communication personnelle, 9 décembre 2022.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2022. Solar Calculation Details. [En ligne] <https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/calcdetails.html>, page consultée le 2 décembre 2022.
- Ontario Ministry of Agriculture and Rural Affairs (OMAFRA). 2022. Irrigation des fraises pour protéger contre le gel. [En ligne] <https://www.ontario.ca/fr/page/irrigation-des-fraisiers-pour-les-protéger-contre-le-gel>, page consultée le 27 février 2023.
- OMAFRA. 2023a. Méthode de protection contre le gel. [En ligne] <https://www.ontario.ca/fr/page/methodes-de-protection-des-cultures-contre-le-gel#section-2>, page consultée le 28 février 2023.
- OMAFRA. 2023b. Irrigation des fraisières pour les protéger contre le gel. [En ligne] <https://www.ontario.ca/fr/page/irrigation-des-fraisiers-pour-les-protéger-contre-le-gel>, page consultée le 14 décembre 2023.
- Ouranos. 2023. Communication personnelle. 8 février 2023.
- Perry, K. B. 1998. Basics of frost and freeze protection for horticultural crops. HortTechnology, 8(1), 10-15.

- Pebesma, E. J. 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. In *Computers & Geosciences*, (30), 683–691.
- Poling, E. B. 2008. Spring cold injury to winegrapes and protection strategies and methods. *HortScience*, 43(6), 1652-1662.
- Pyra, N. et S. N. Wood. 2015. Shape constrained additive models. *Statistics and computing*, 25, 543-559.
- Quénoel, H. et G. Beltrando. 2006. Impact des haies brise-vent sur le gel printanier en arboriculture. *Climatologie*, 3, 9-23.
- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rasband, W.S. 1997-2018. ImageJ. U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA [En ligne] <https://imagej.nih.gov/ij/>, page consultée le 14 mars 2021.
- Smith, E. D. 2019. Cold hardiness and options for the freeze protection of southern highbush blueberry. *Agriculture*, 9(1), 9.
- Snyder, R. L. et Melo-Abreu, J. 2005. Frost protection: fundamentals, practice and economics. Volume 1. Frost protection: fundamentals, practice and economics, 1, 1-240. [En ligne] <https://www.fao.org/3/y7223e/y7223e08.htm#TopOfPage>, page consultée le 14 mars 2022.
- Tow and Blow. 2021. 250 h specification brochure [En ligne] <https://www.towandblow.co.nz/product/250h/>, page consultée le 24 novembre 2021.
- Tow and Blow. 2022. Communication personnelle. 18 septembre 2022.
- 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.
- Wadas, W. 2016. Using non-woven polypropylene covers in potato production: a review. *Journal of Central European Agriculture*.
- Wickham, H. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4 [En ligne] <https://ggplot2.tidyverse.org>.
- Wood, S.N. 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R* (2nd edition). Chapman and Hall/CRC.

Annexe 1. Plans des sites d'essai

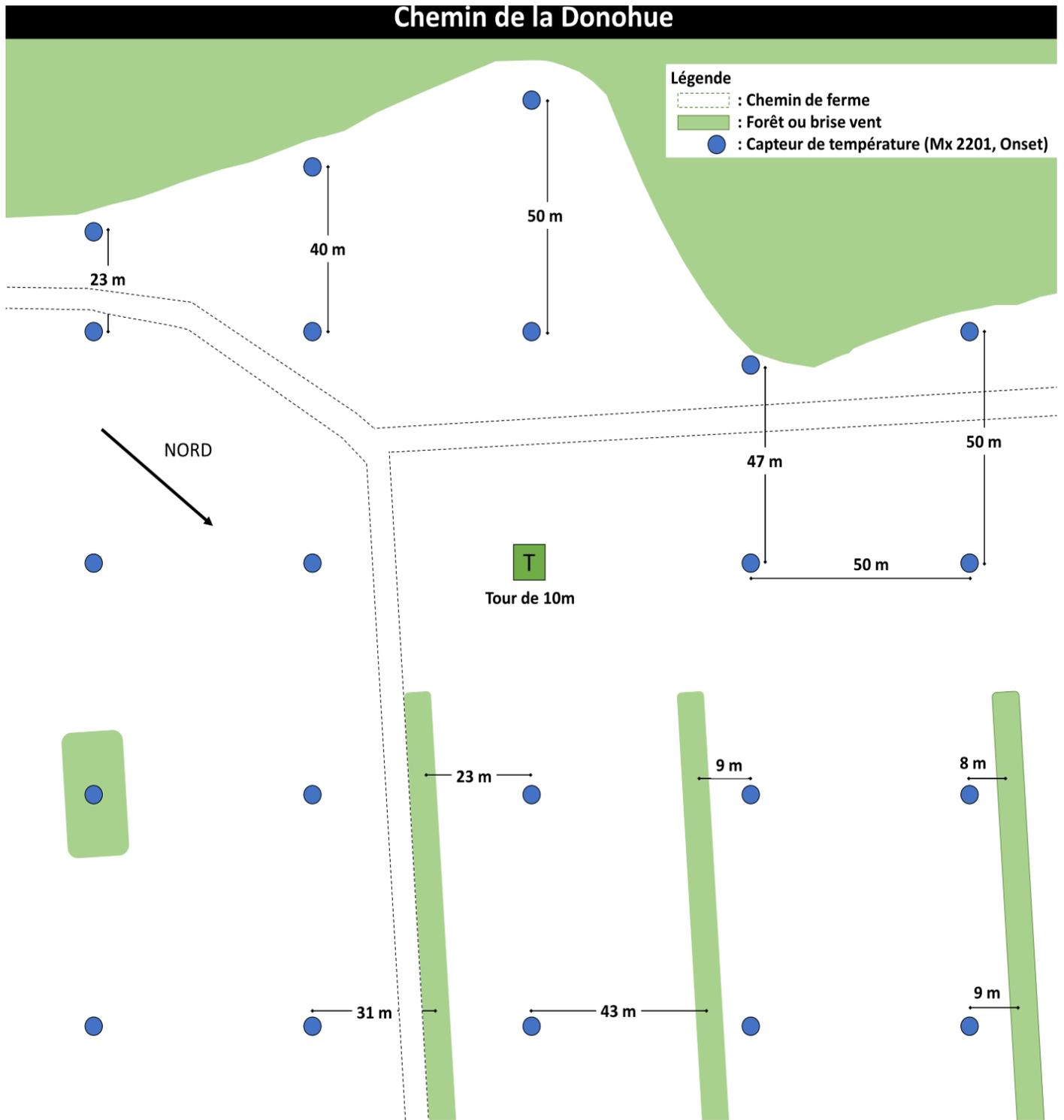


Figure 54. Schéma des installations du site « Machine à vent », automne 2020.

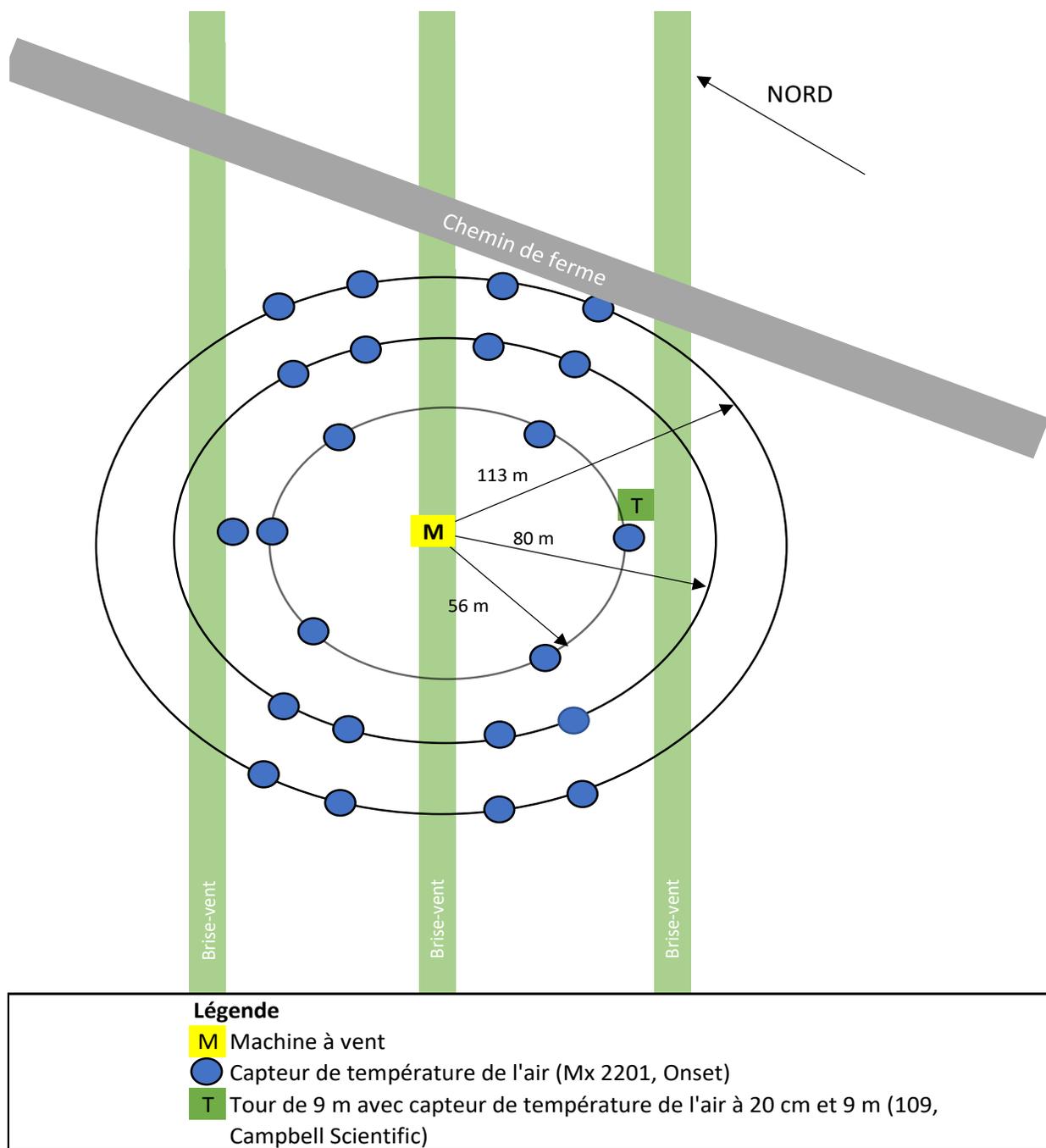


Figure 55. Schéma des installations du site « Machine à vent », automne 2021.

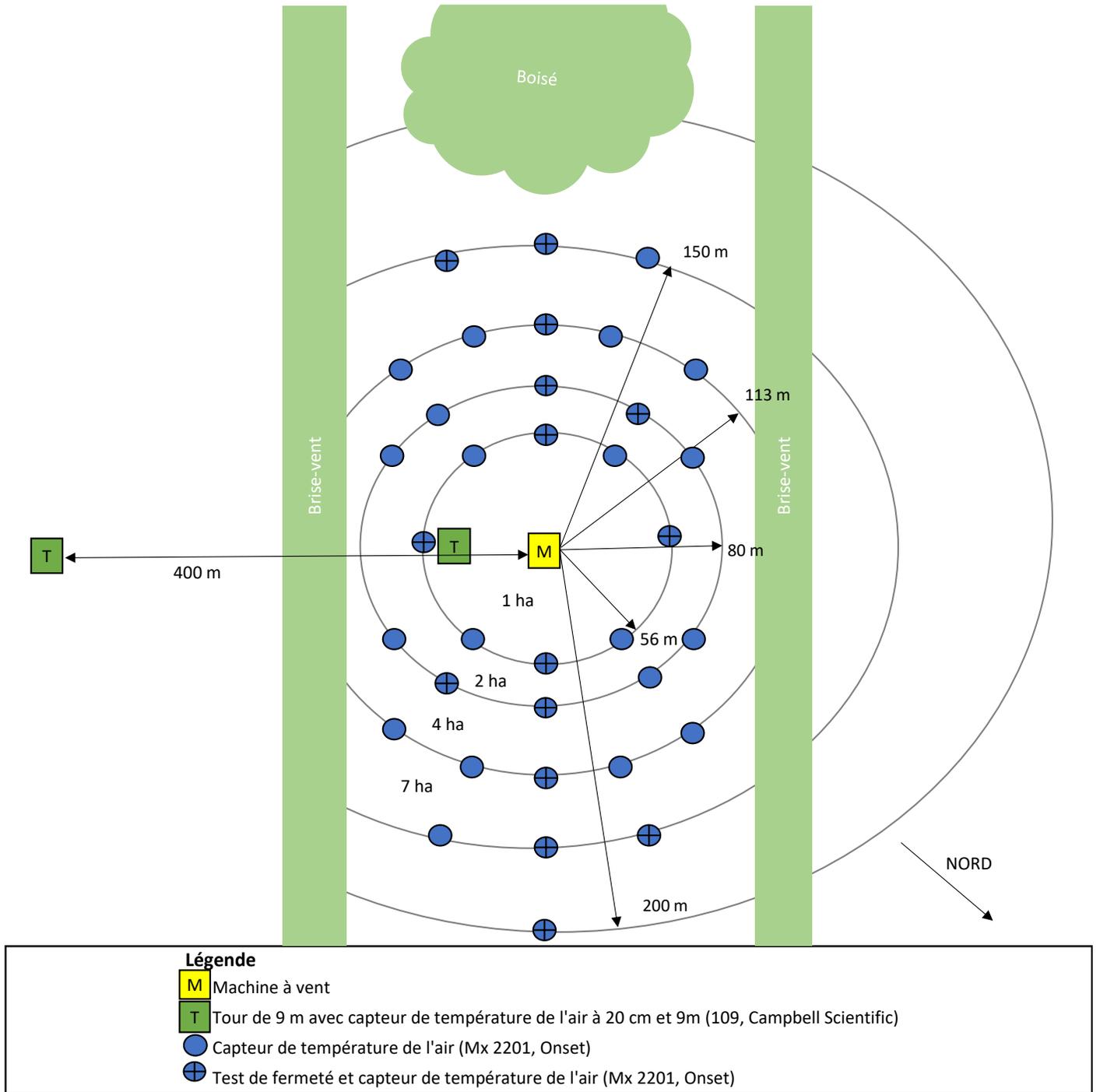


Figure 56. Schéma des installations du site « Machine à vent », automne 2022.

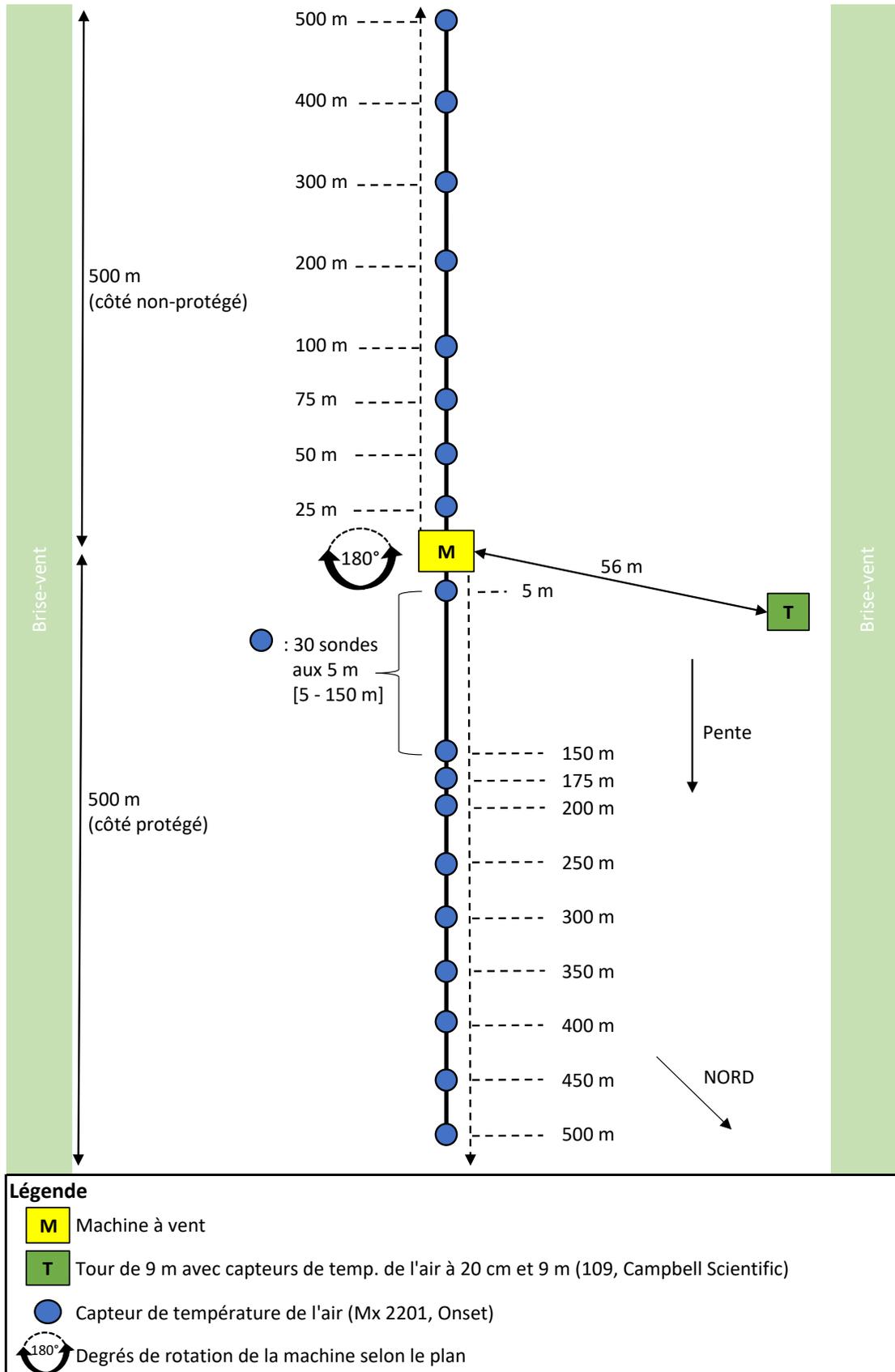


Figure 57. Schéma des installations du site « Machine à vent », printemps 2022.

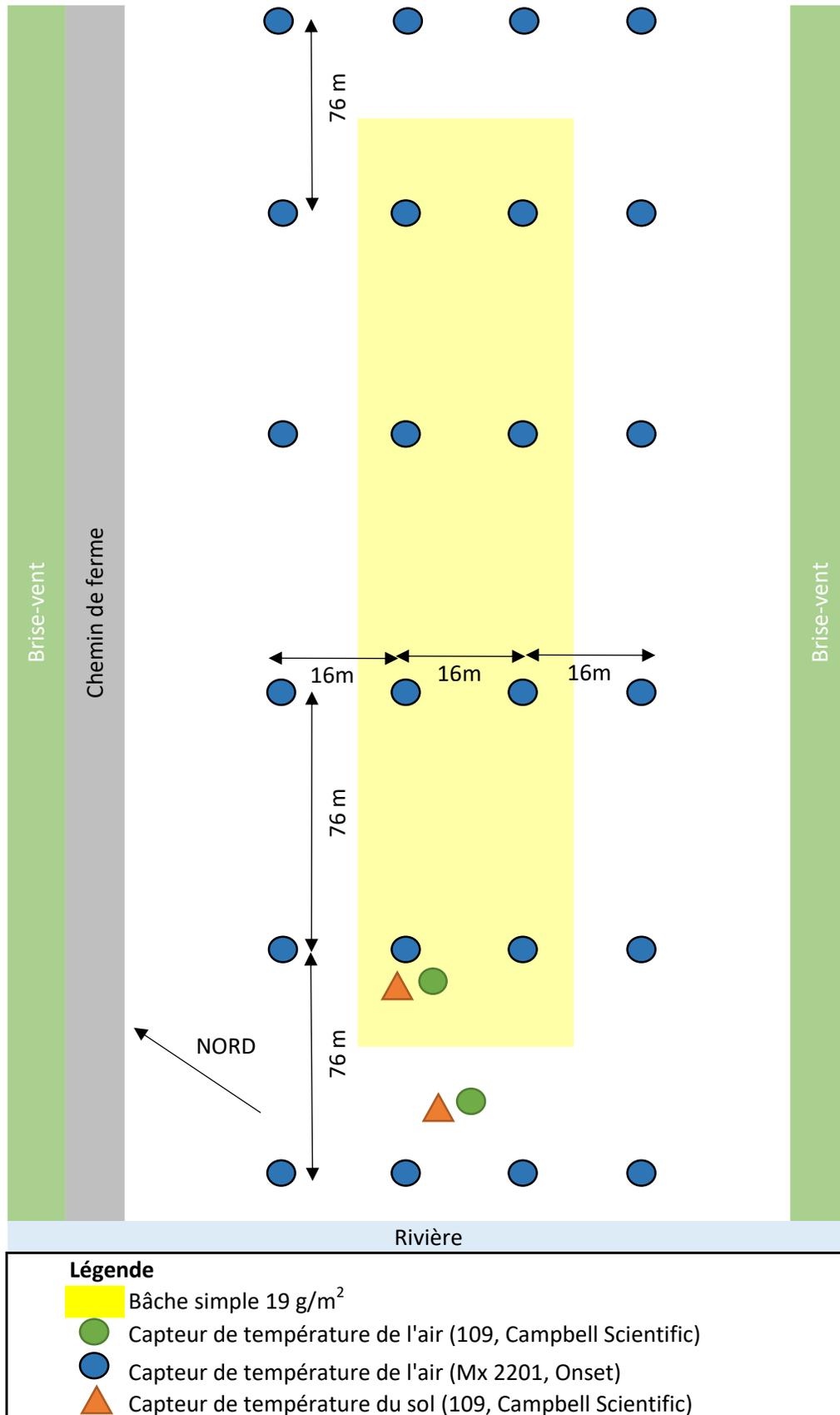


Figure 58. Schéma des installations du site « Bâche », 2020.

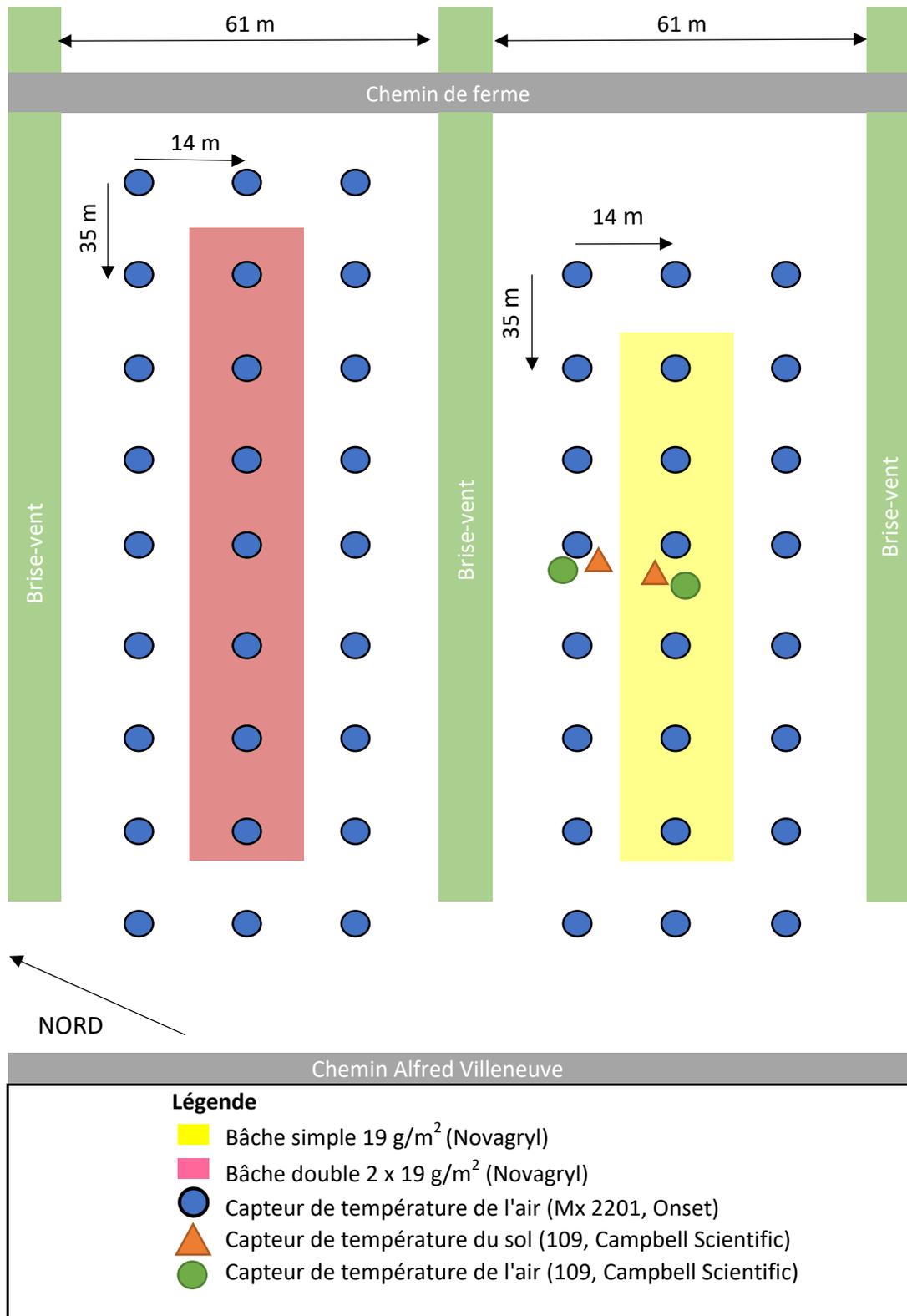


Figure 59. Schéma des installations du site « Bâches », 2021.

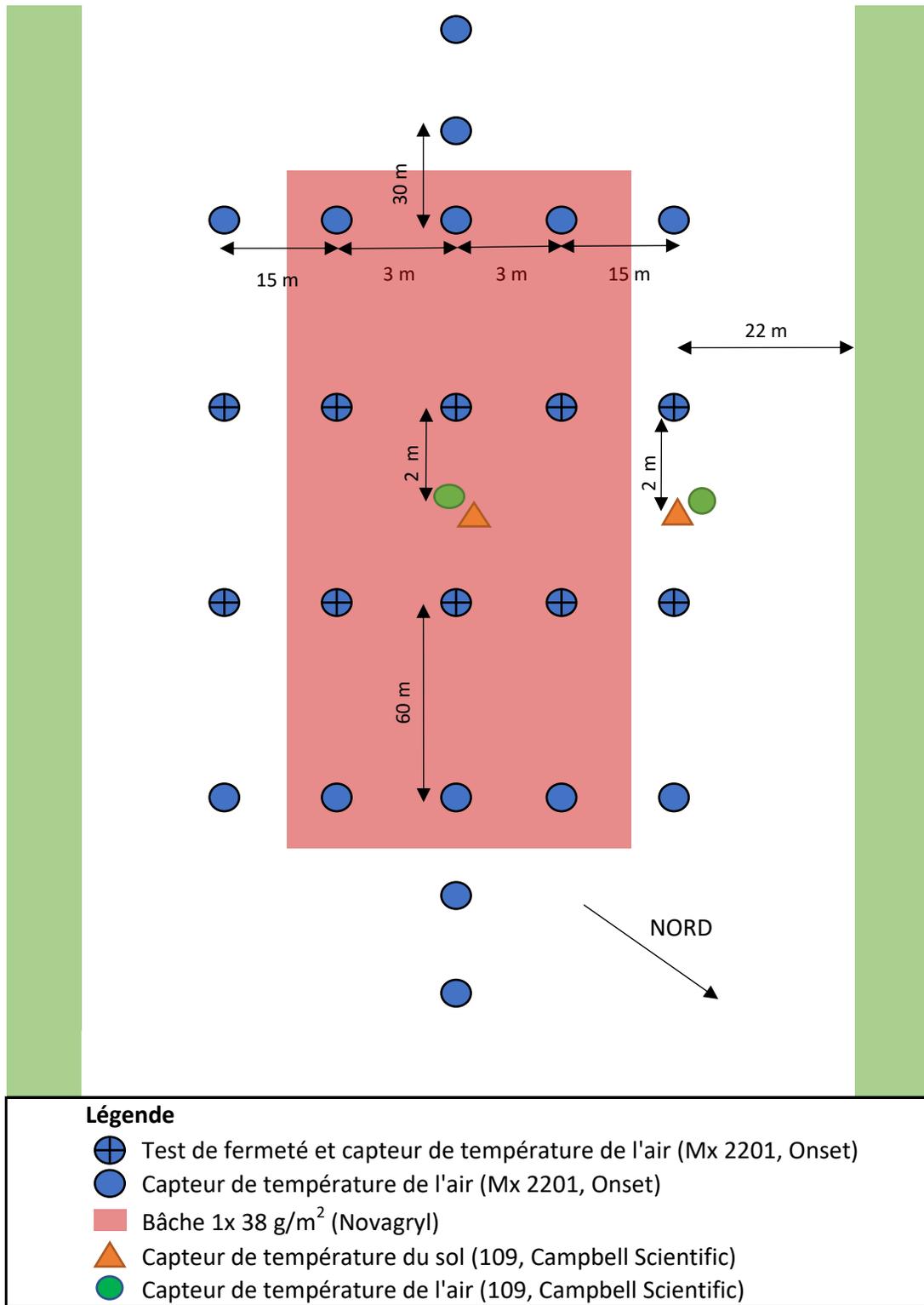


Figure 60. Schéma des installations du site « Bâches », 2022

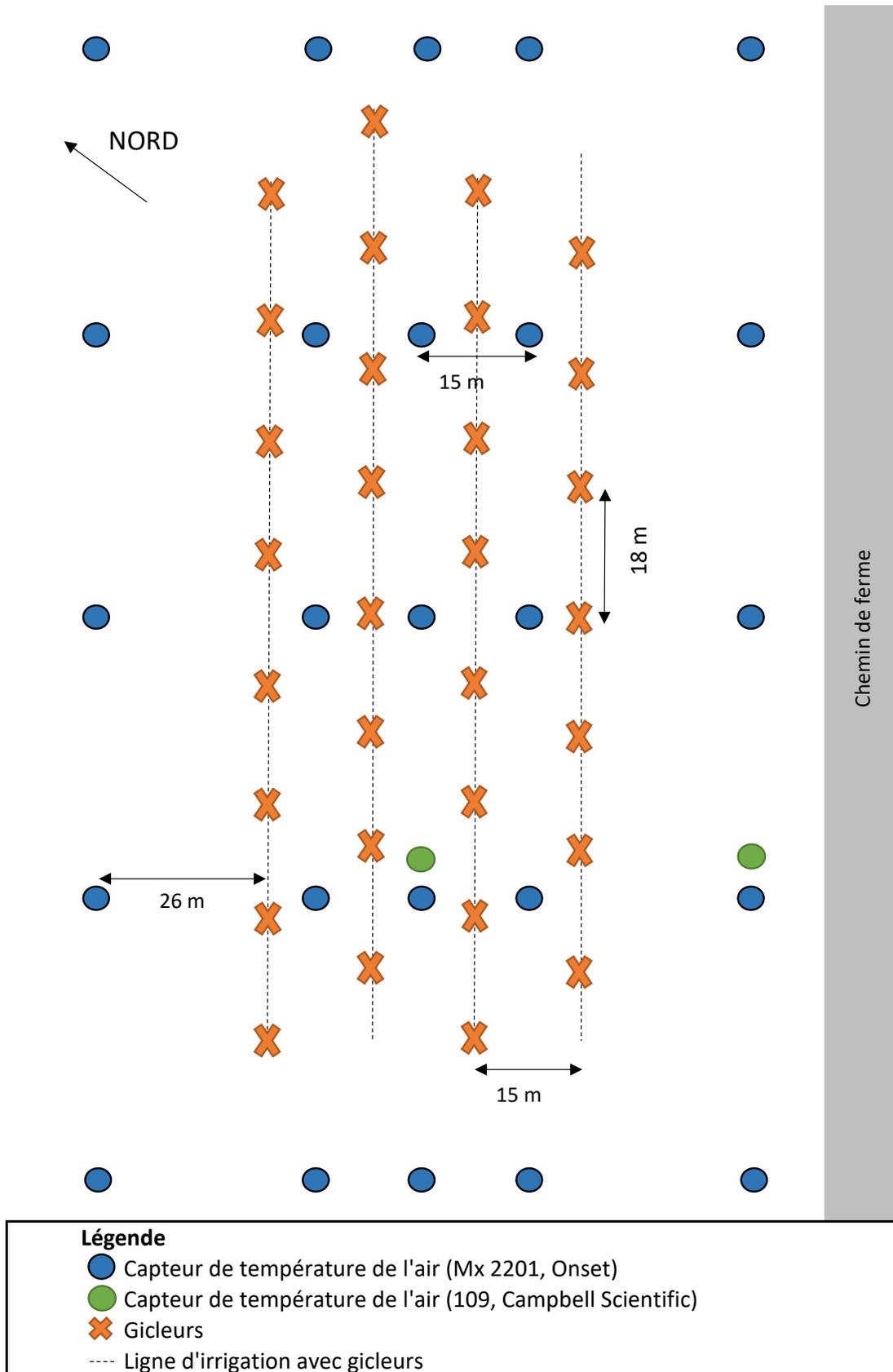


Figure 61. Schéma des installations du site « Irrigation », 2020

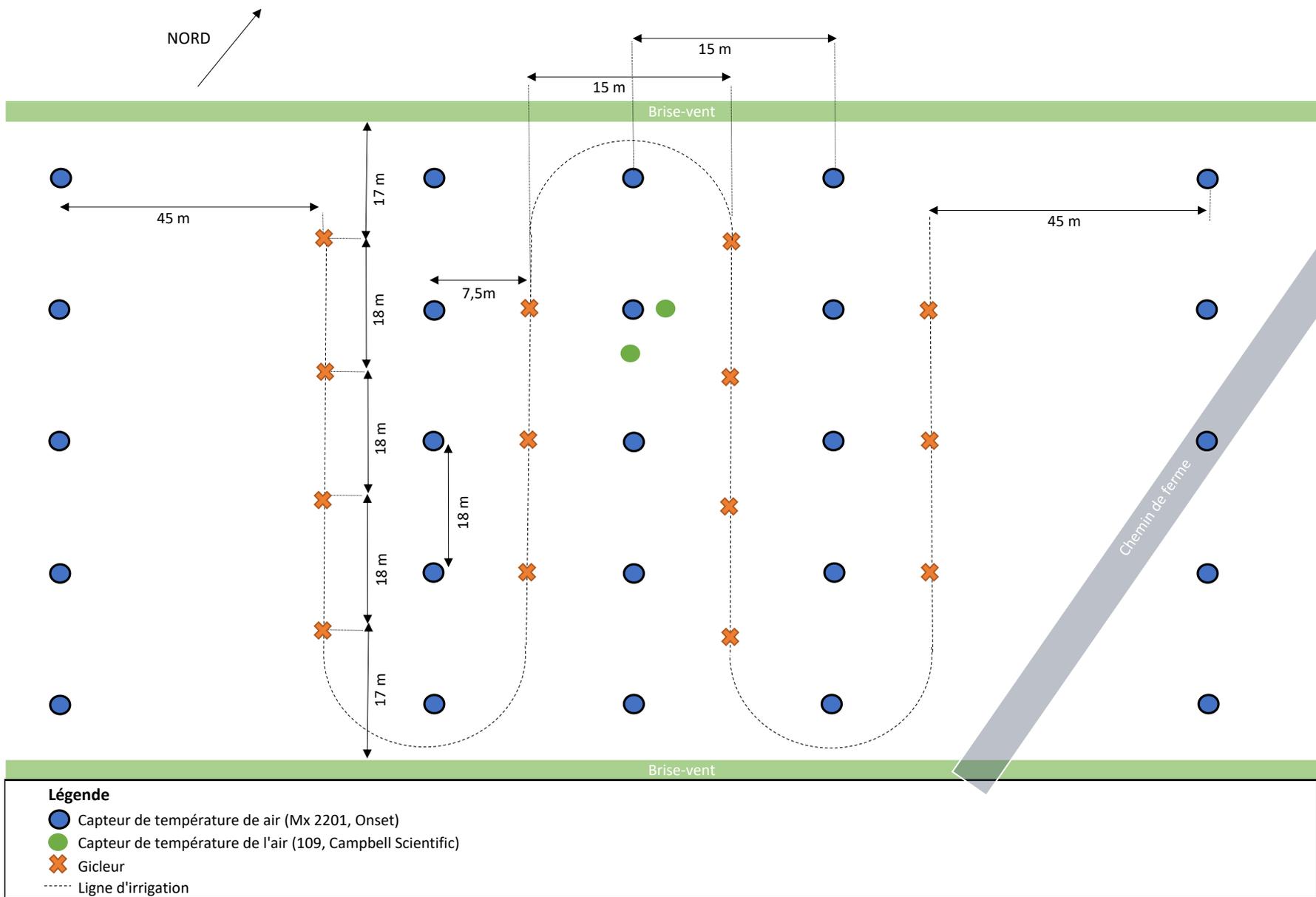


Figure 62. Schéma des installations du site « Irrigation », 2021.

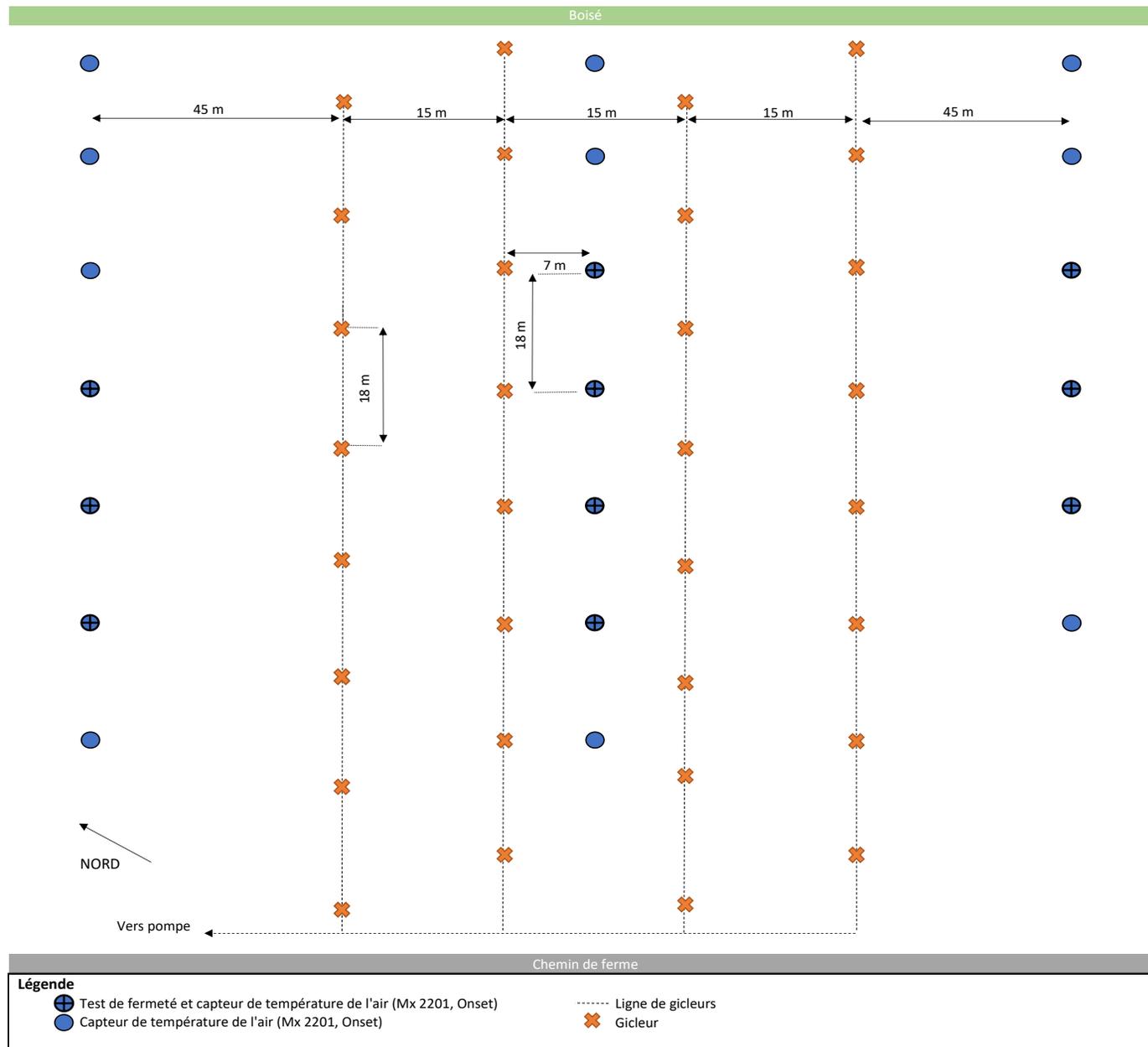


Figure 63. Schéma des installations du site « Irrigation », 2022

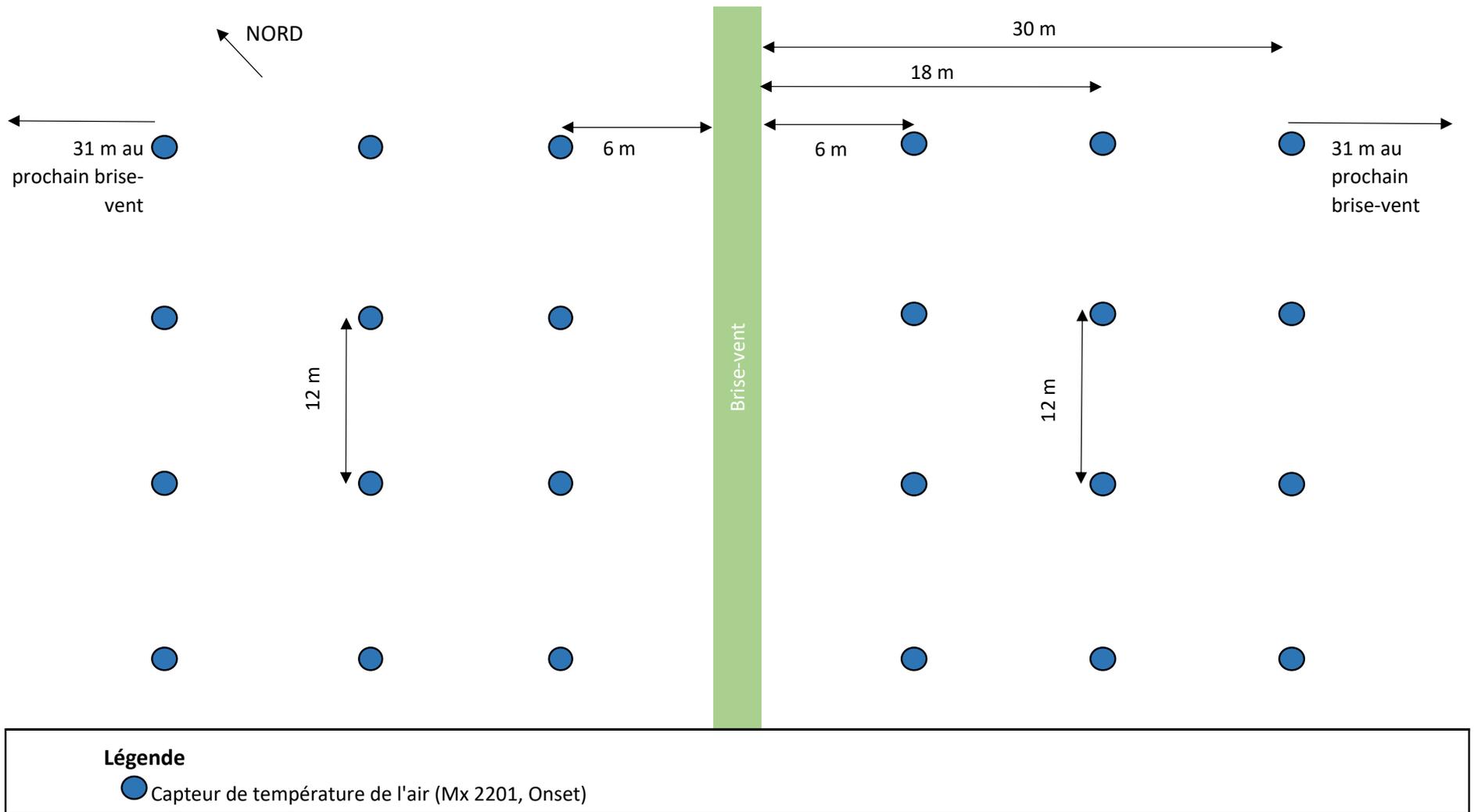


Figure 64. Schéma des installations du site « Brise-vent », 2020.

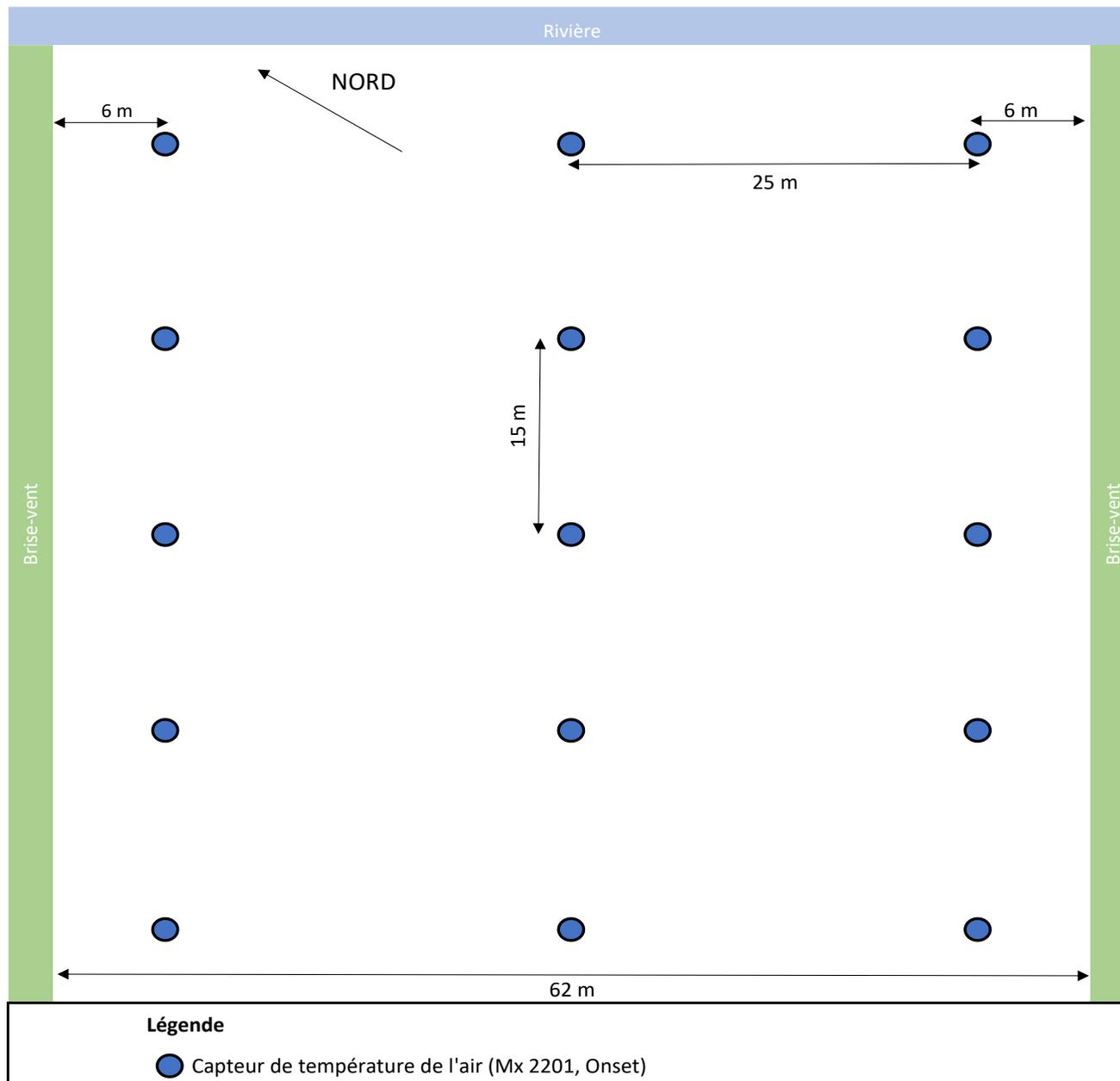


Figure 65. Schéma des installations du site « Brise-vent », 2021.

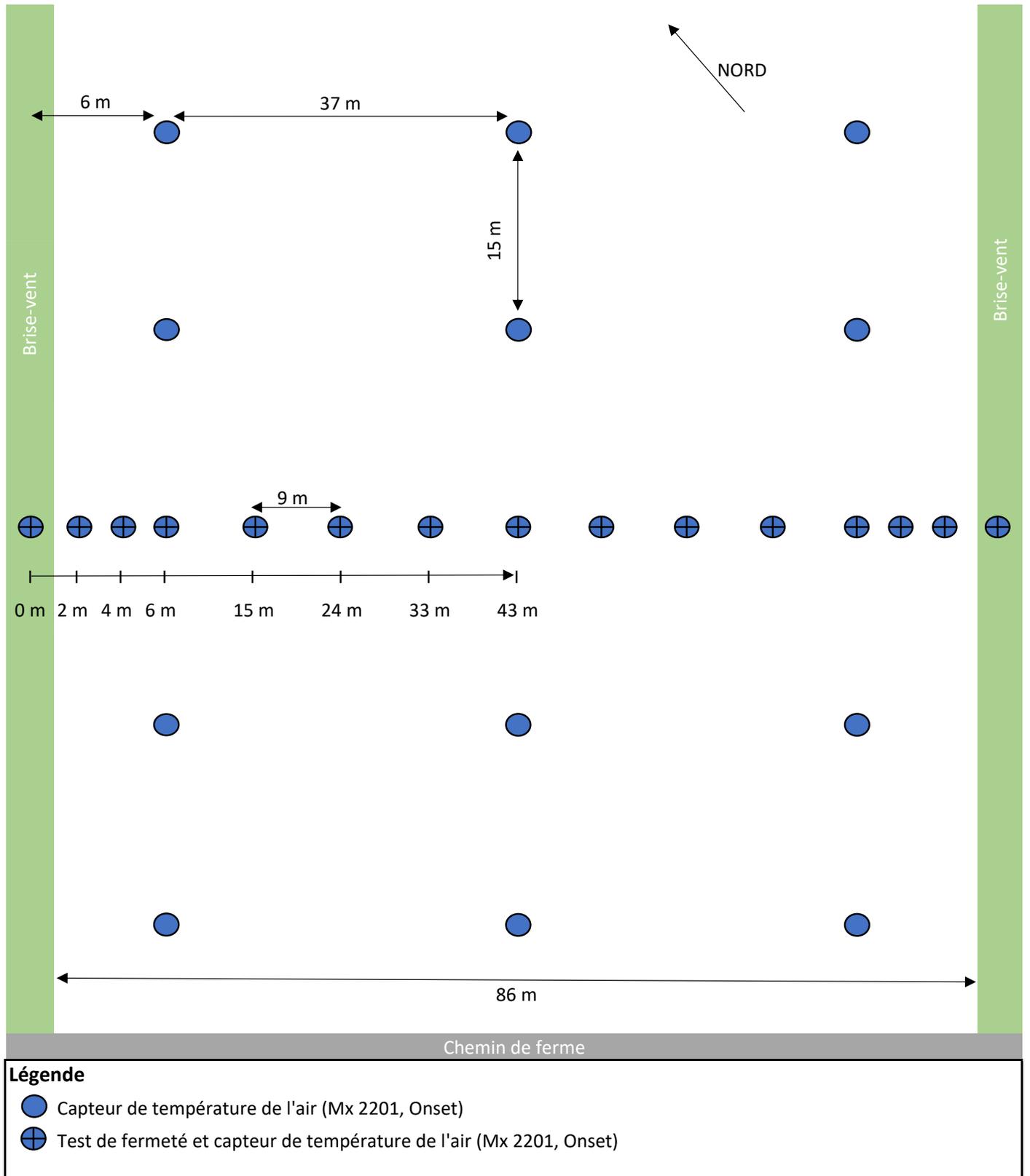


Figure 66. Schéma des installations du site « Brise-vent », 2022.

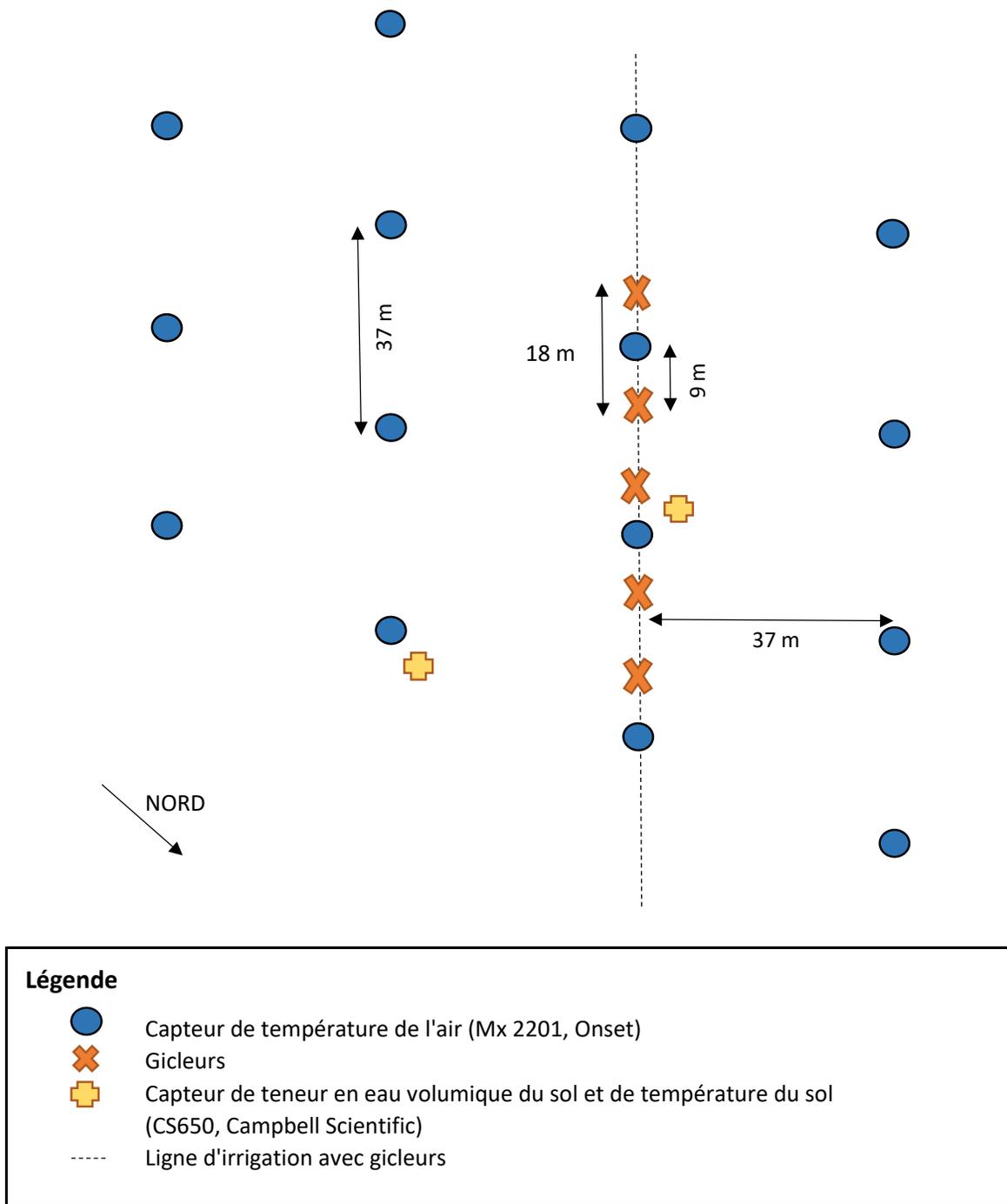


Figure 67. Schéma des installations du site « Irrigation sol sec », 2020.

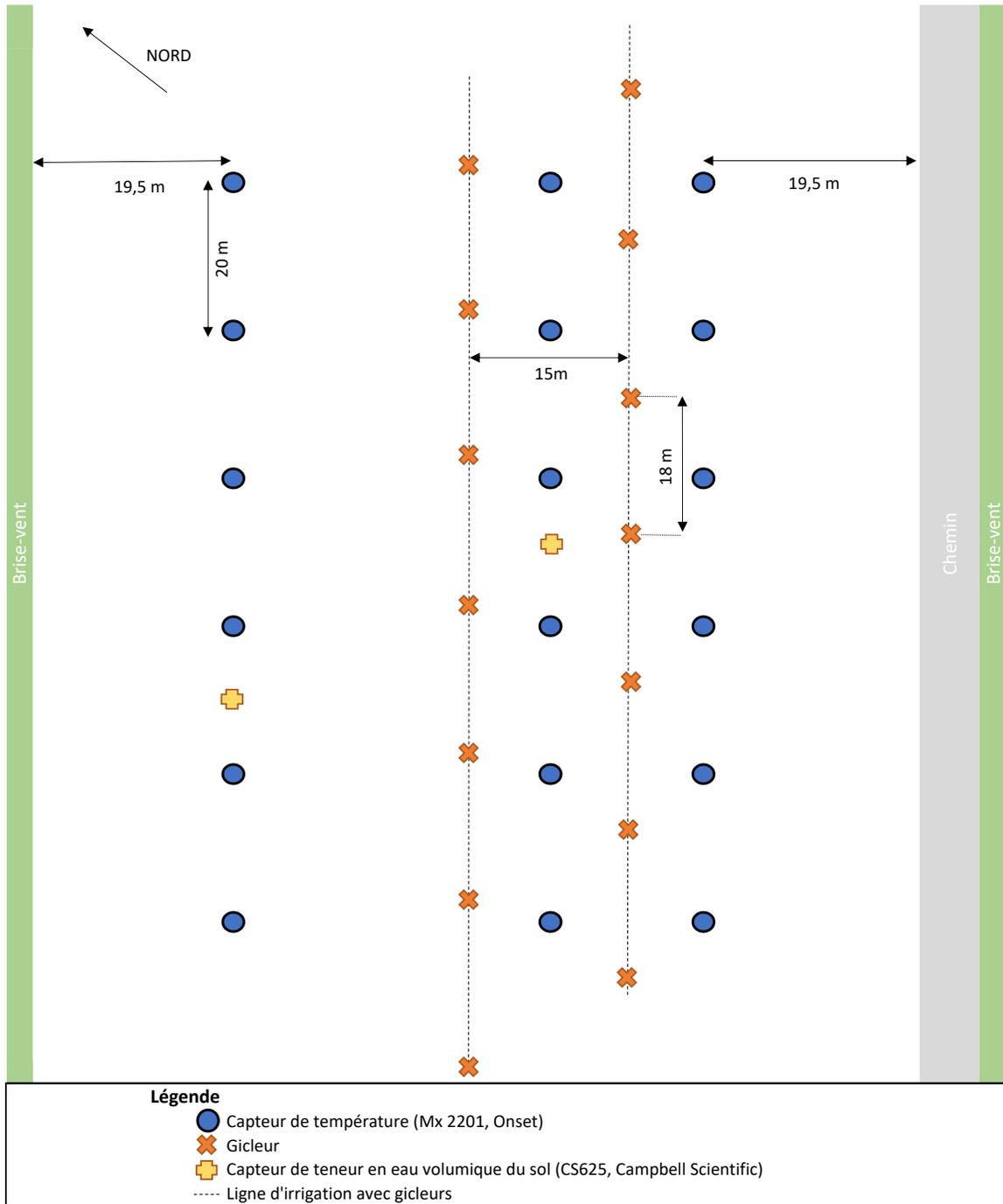


Figure 68. Schéma des installations du site « Irrigation du sol sec », 2021.

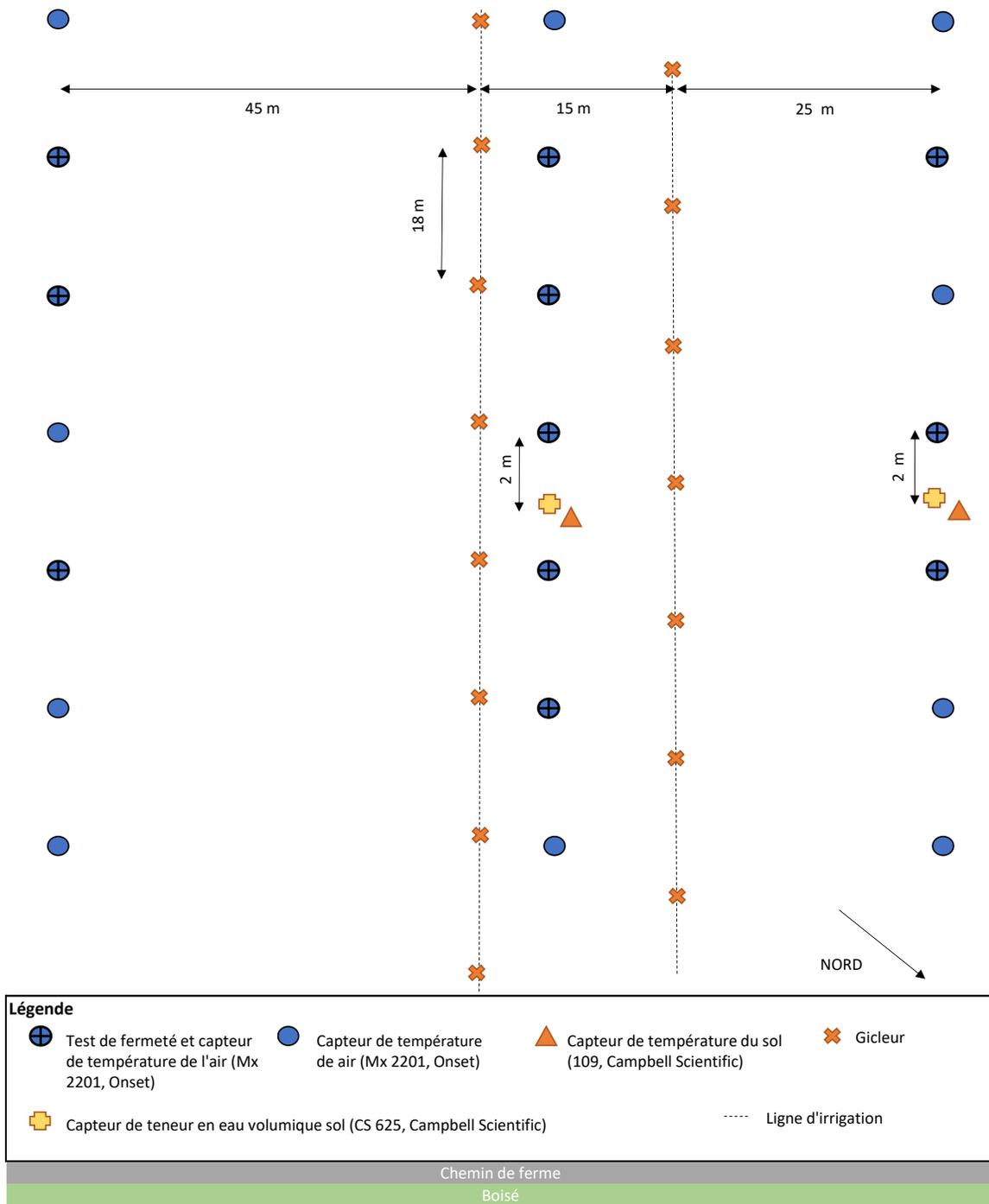


Figure 69. Schéma des installations du site « Irrigation du sol sec », 2022.

Annexe 2. Matériel complémentaire à la section 3.2.7

Tableau 13. Stations météorologiques utilisées pour valider les réanalyses ERA5 et sources d'information.

Longitude (°)	Latitude (°)	Nom de la station	Source
-71,14	48,43	Jonquière	Env. Can.
-71,13	48,31	Laterrière	Env. Can.
-71,00	48,33	Bagotville A	Env. Can.
-71,03	48,89	Onatchiway	Env. Can.
-71,78	48,48	Saint-Gédéon	Env. Can.
-71,85	48,65	Saint-Henri	Env. Can.
-70,54	48,37	Cap-Rouge	Env. Can.
-72,27	48,52	Roberval A	Env. Can.
-70,11	48,26	Pointe Claveau	Env. Can.
-72,55	48,84	Normandin	Env. Can.
-72,10	48,44	Chambord	FADQ
-71,70	48,75	Chute du Diable	ALCAN
-71,74	48,42	Hébertville	FADQ
-70,92	48,29	La Baie F	FADQ
-72,63	48,14	Lac Panache	SOPFEU
-70,25	48,92	Laflamme	SOPFEU
-71,72	48,60	Mistook	ALCAN
-72,51	48,86	Normandin F	FADQ
-69,80	48,22	Sacré-Cœur	FADQ
-71,17	48,38	Saguenay	FADQ
-71,34	48,57	Saint-Ambroise F	FADQ
-71,97	48,81	Saint-Augustin (Dalmas)	FADQ
-71,40	48,50	Saint-Charles-de-Bourget	FADQ
-71,72	48,67	Saint-Coeur-de-Marie	FADQ
-72,27	48,97	Saint-Eugène-d'Argentenay	FADQ
-71,74	48,50	Saint-Gédéon-de-Grandmont	FADQ
-72,41	48,62	Saint-Prime	FADQ

Annexe 3. Graphiques des conditions météo

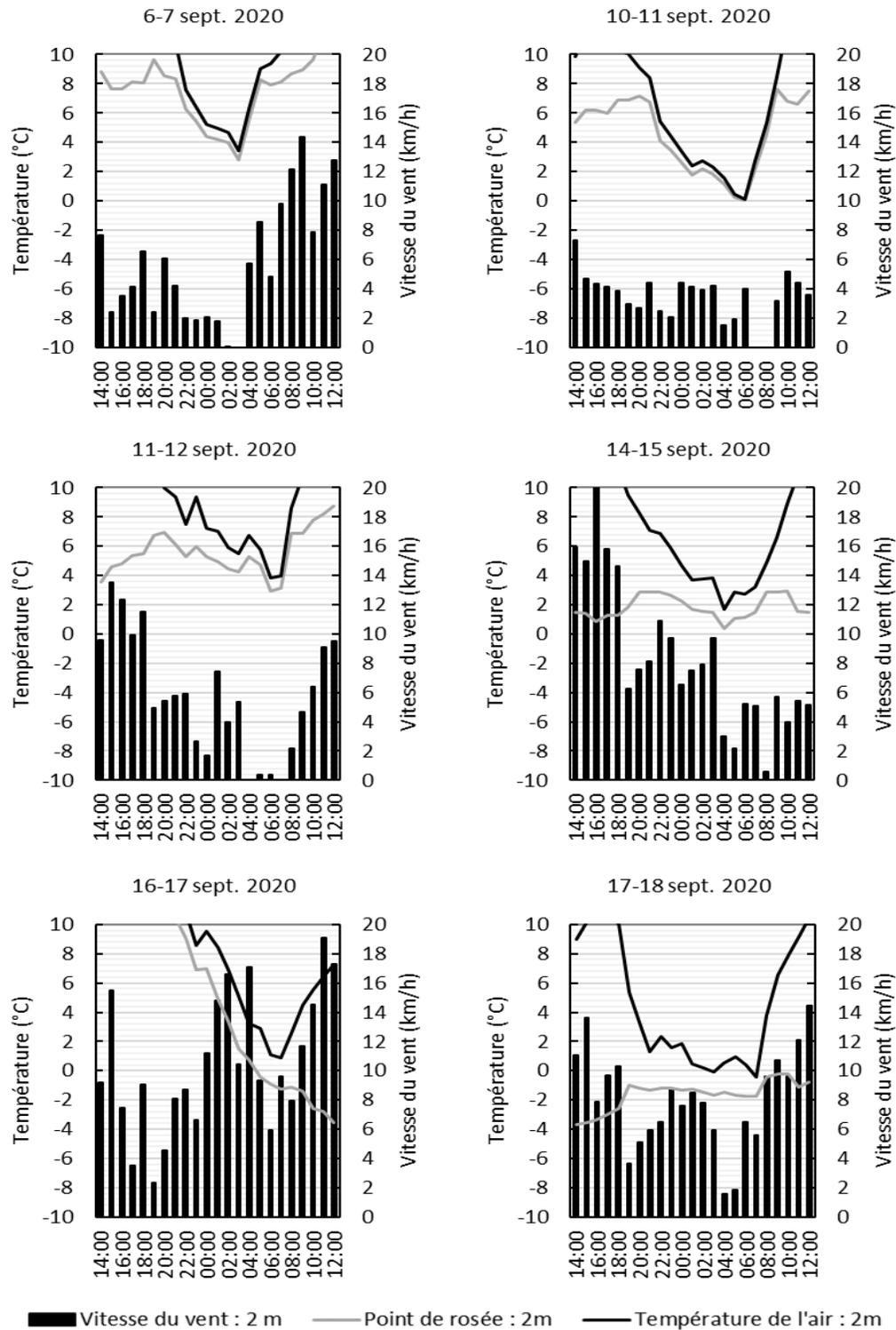


Figure 70. Conditions météorologiques enregistrées à la station météo C lors des épisodes de gel de l'automne 2020 (1/2). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

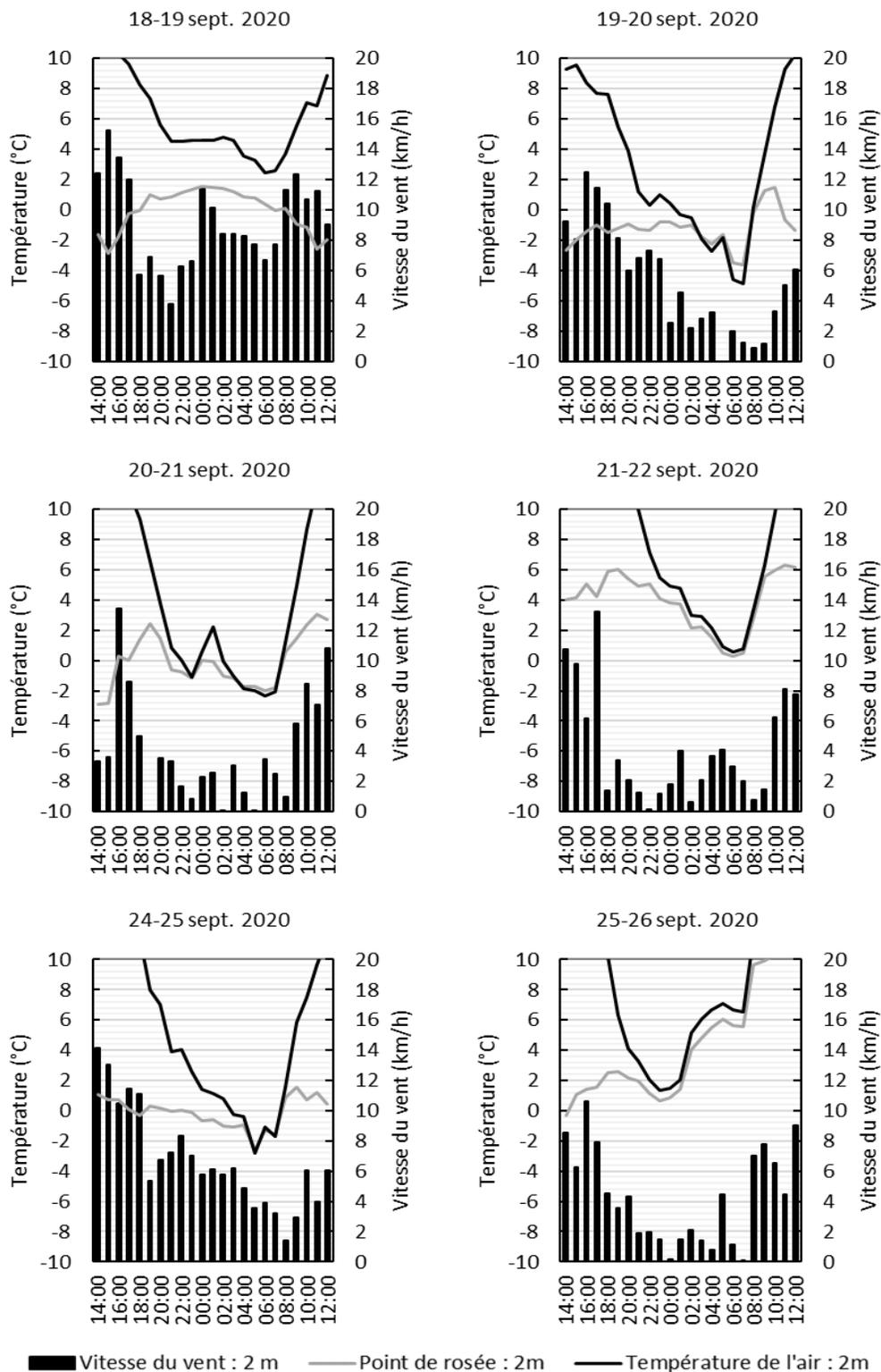


Figure 71. Conditions météorologiques enregistrées à la station météo C lors des épisodes de gel de l'automne 2020 (2/2). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

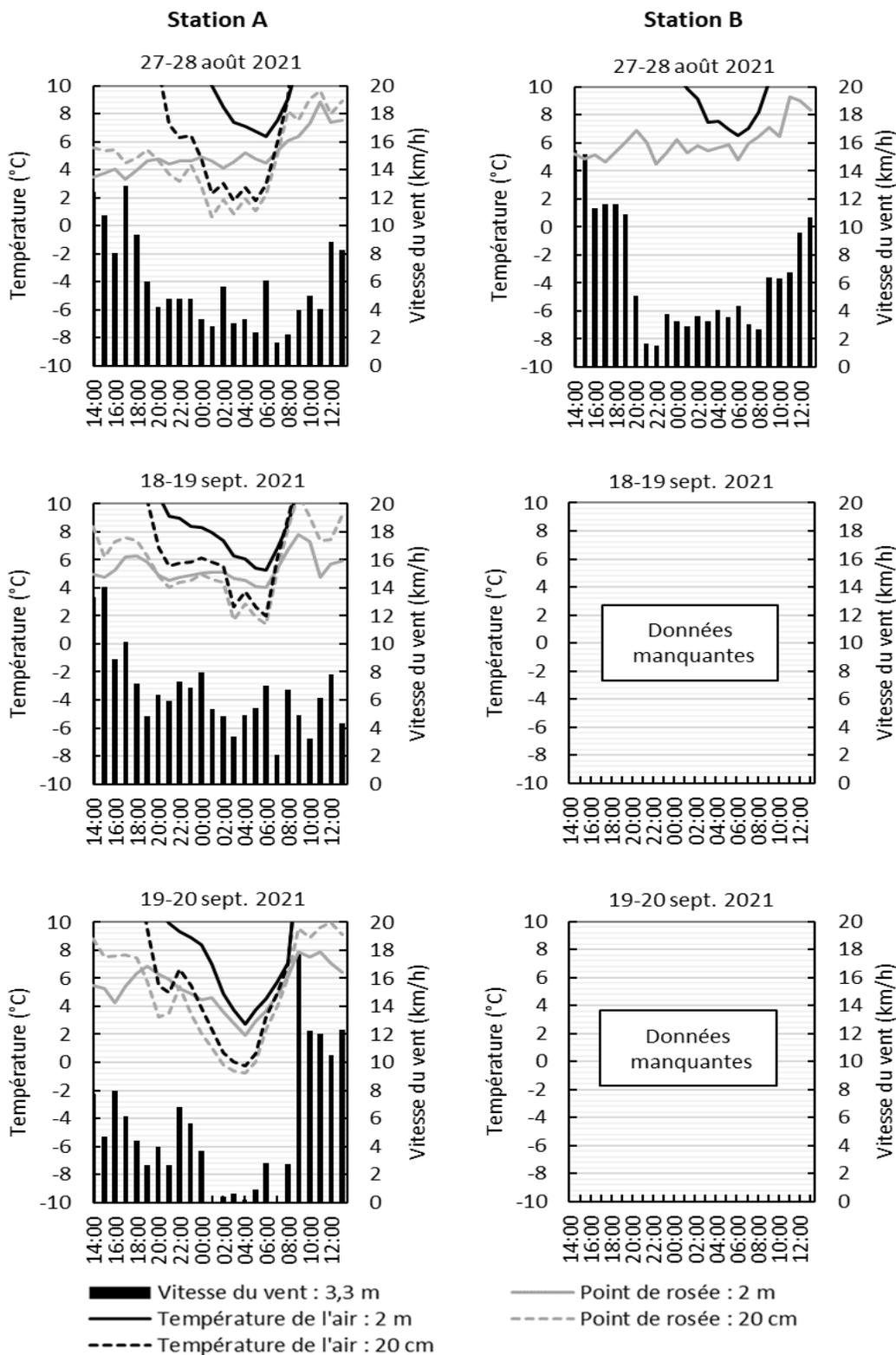


Figure 72. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et B lors des épisodes de gel de l'automne 2021 (1/4). Vitesse du vent à 3,3 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m et à 20 cm (°C).

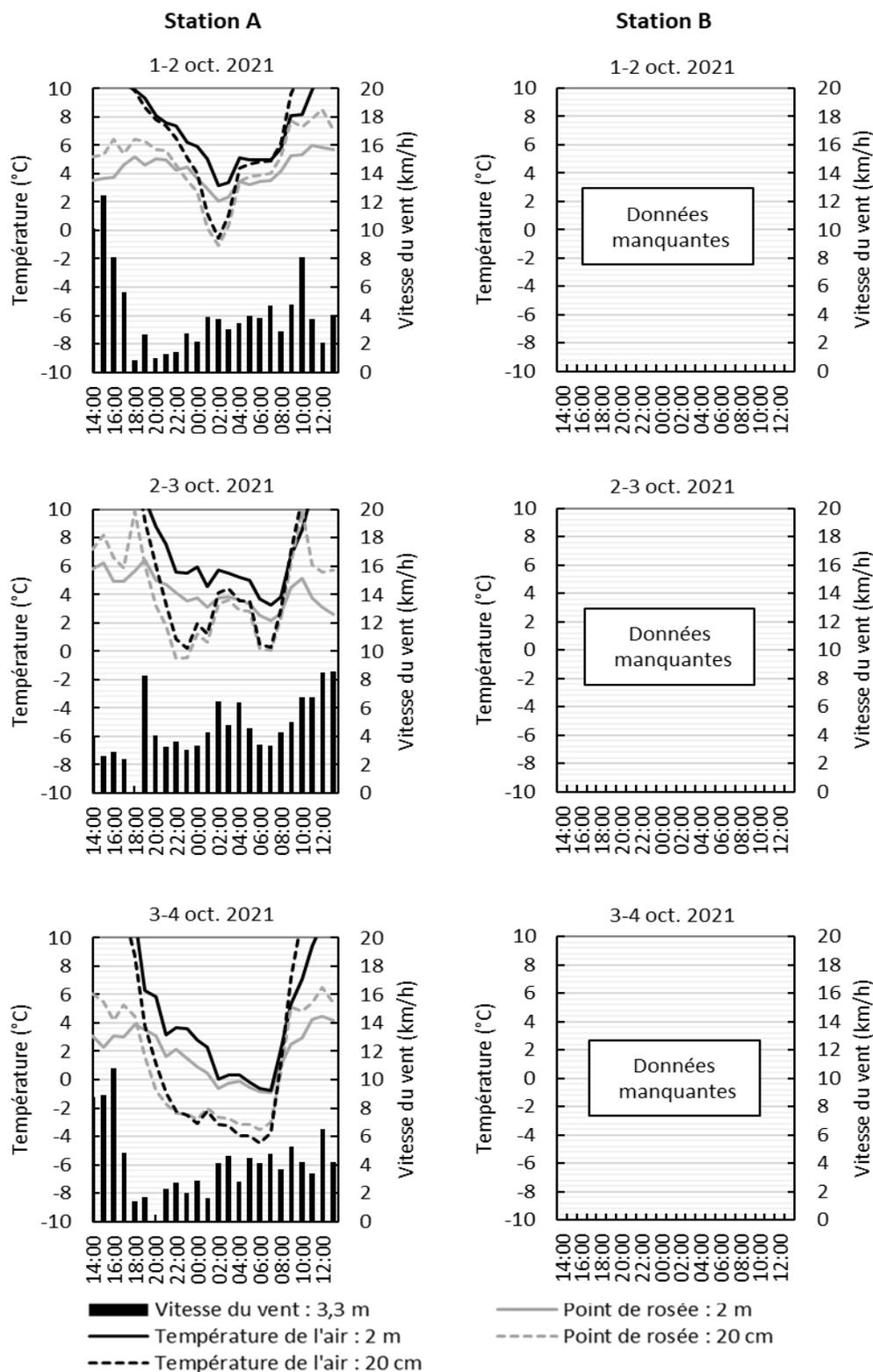


Figure 73. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et B lors des épisodes de gel de l'automne 2021 (2/4). Vitesse du vent à 3,3 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m et à 20 cm (°C).

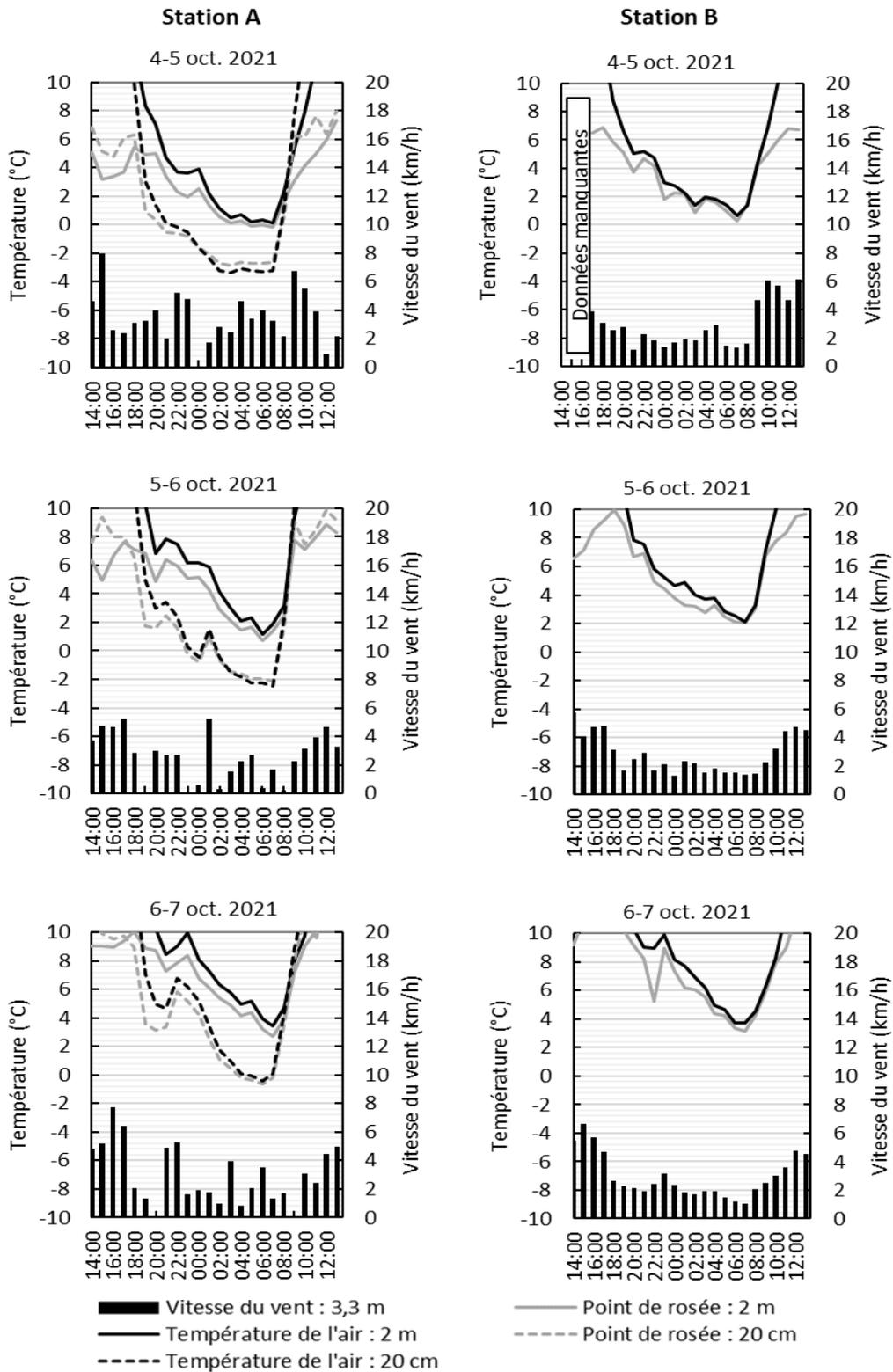


Figure 74. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et B lors des épisodes de gel de l'automne 2021 (3/4). Vitesse du vent à 3,3 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m et à 20 cm (°C).

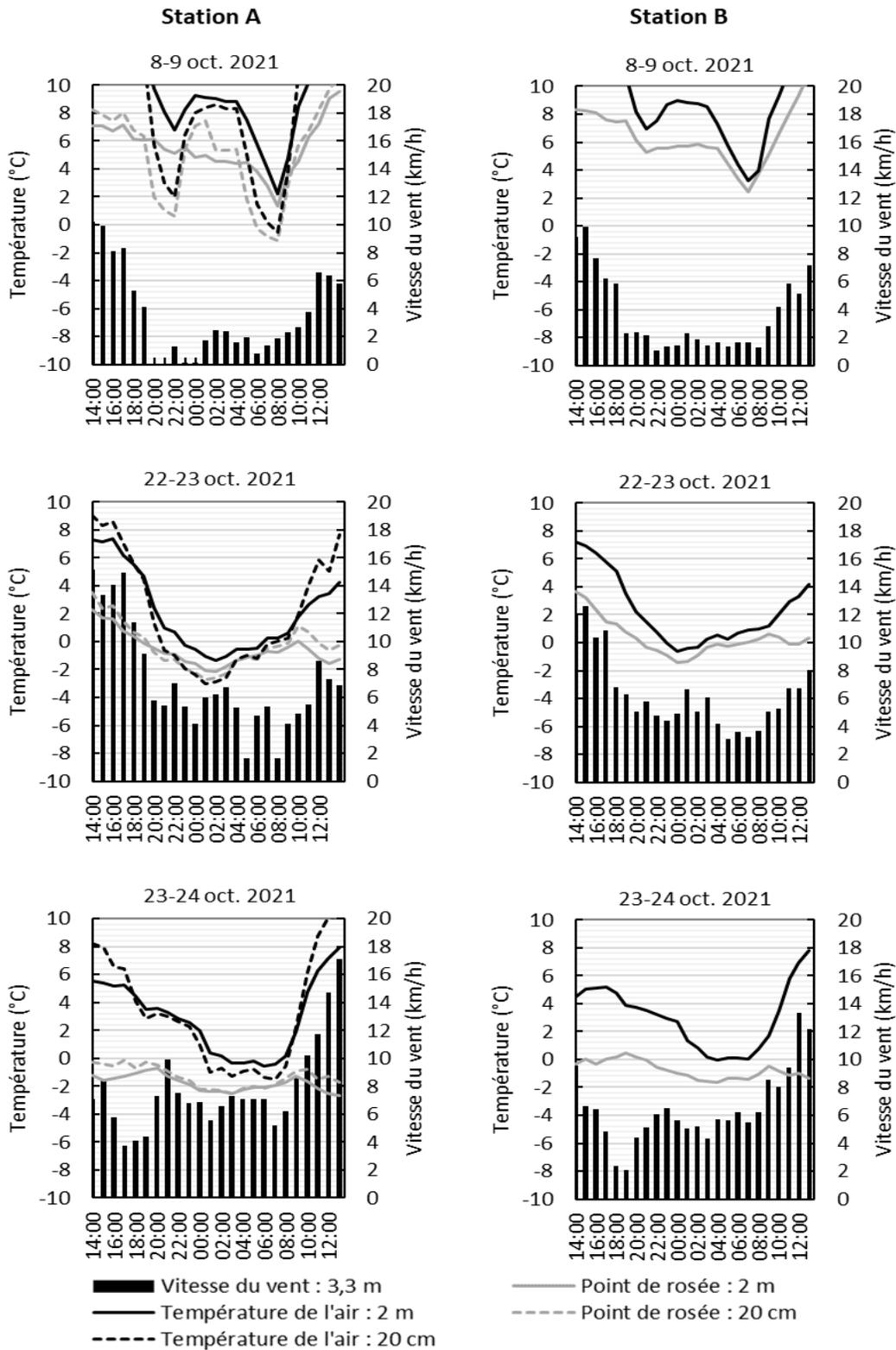


Figure 75. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et B lors des épisodes de gel de l'automne 2021 (4/4). Vitesse du vent à 3,3 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m et à 20 cm (°C).

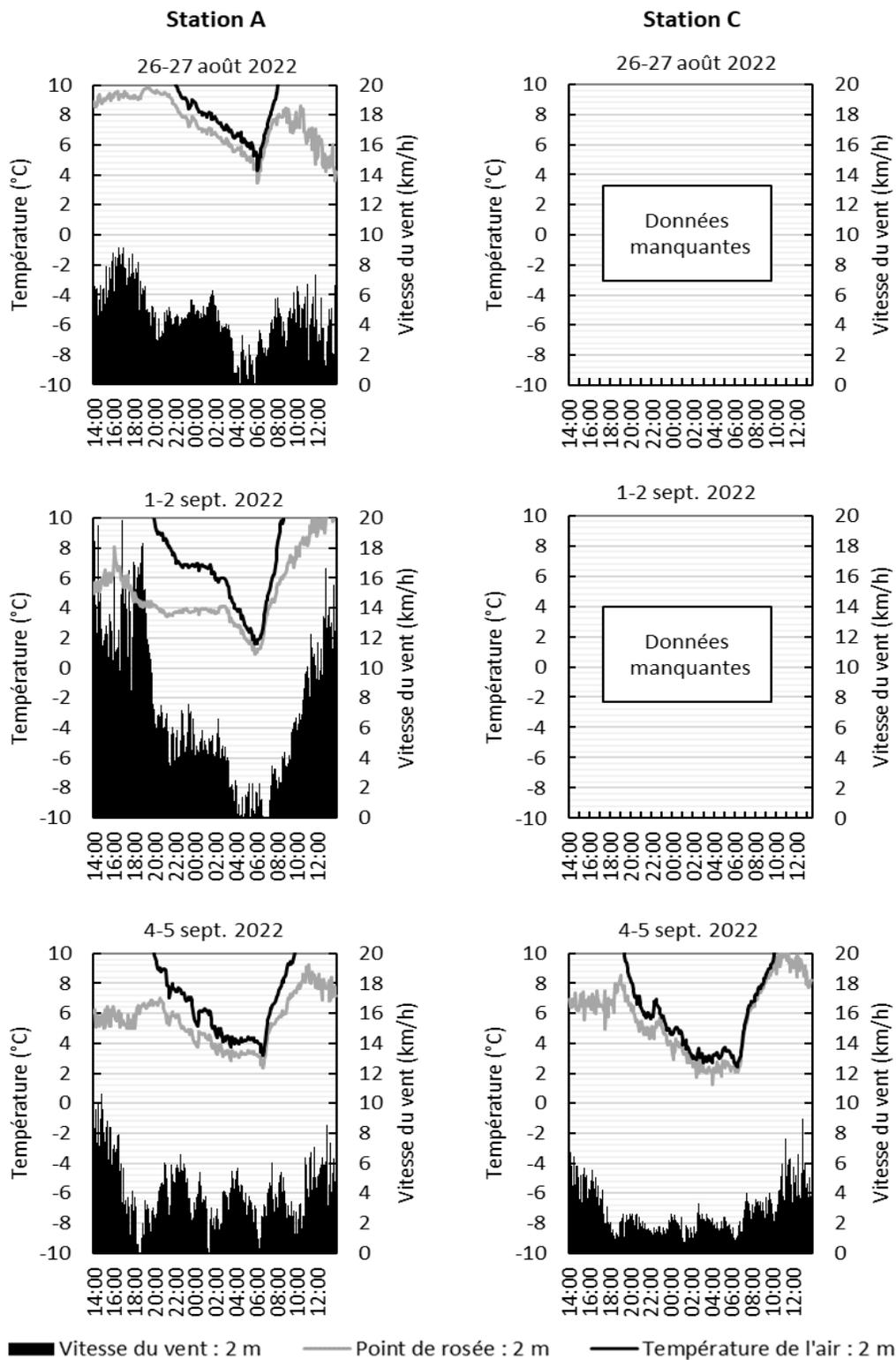


Figure 76. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (1/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

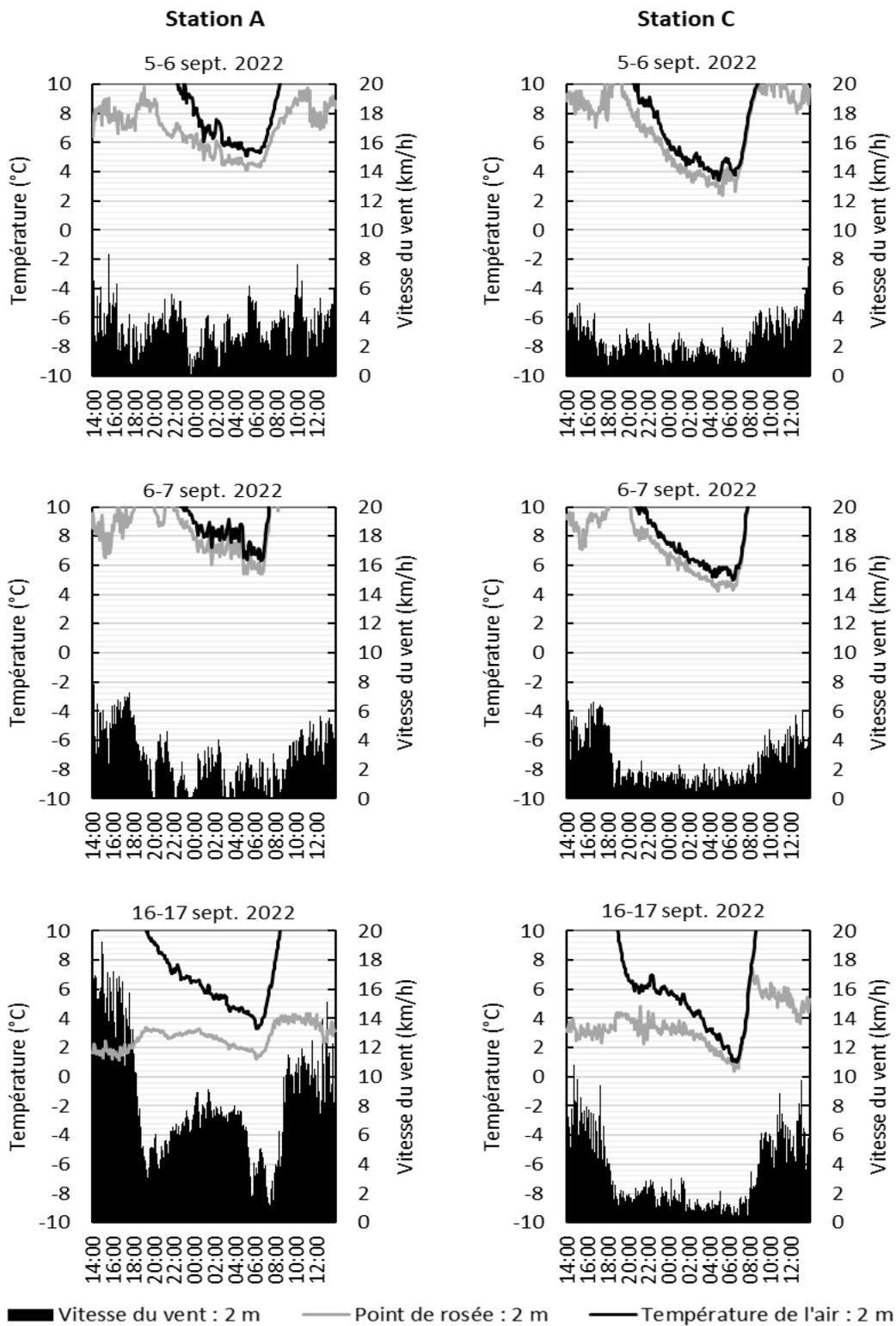


Figure 77. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (2/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

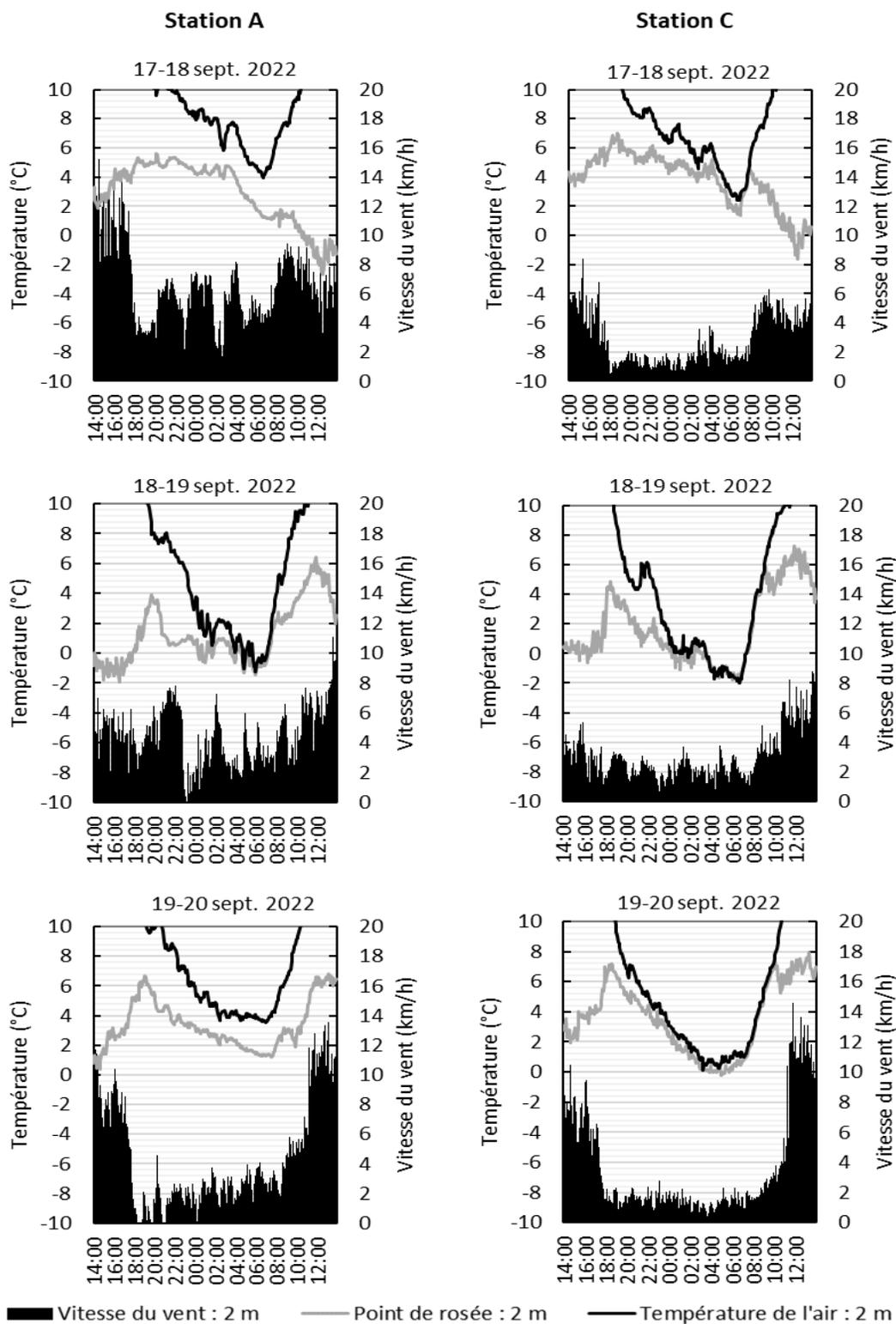


Figure 78. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (3/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

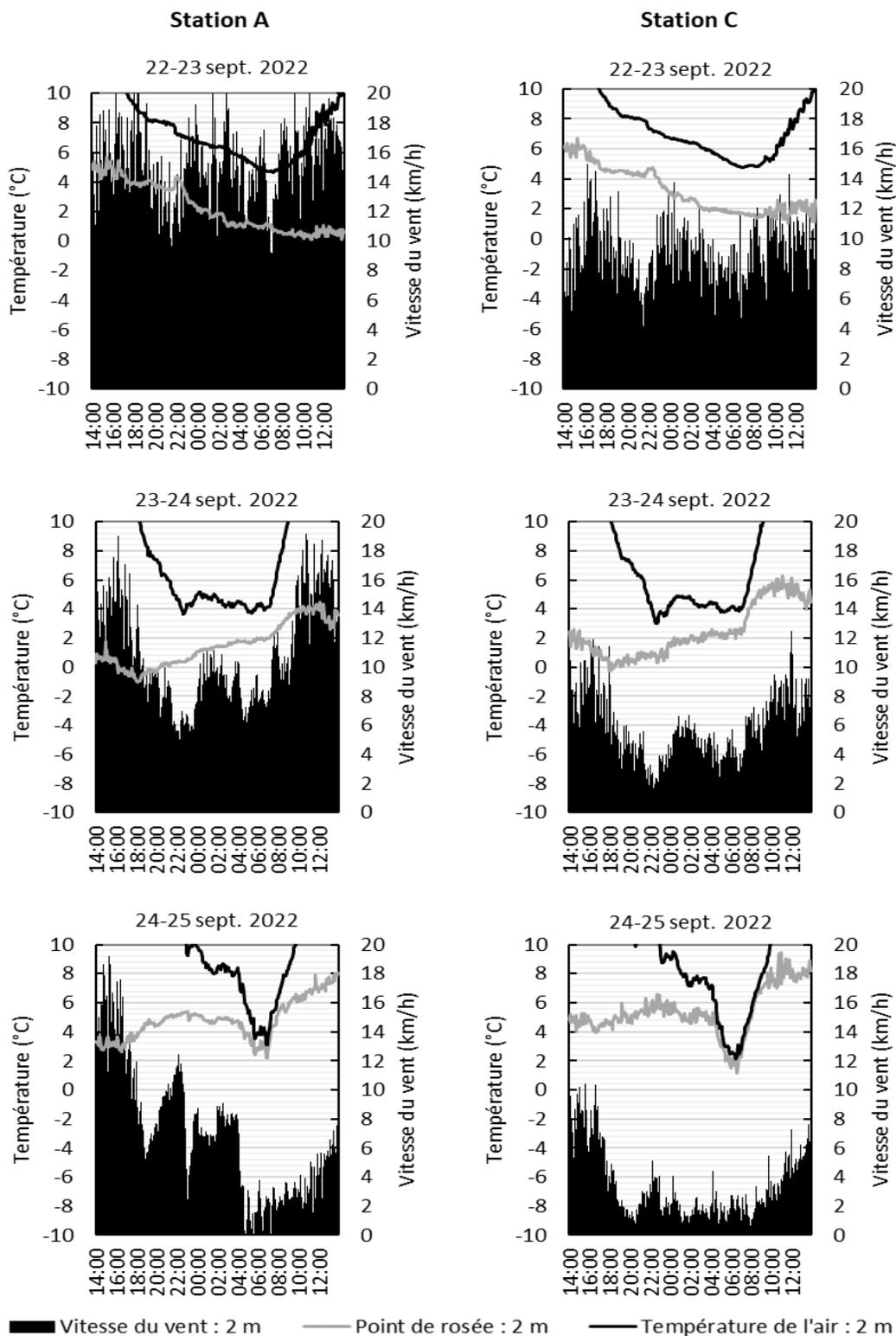


Figure 79. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (4/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

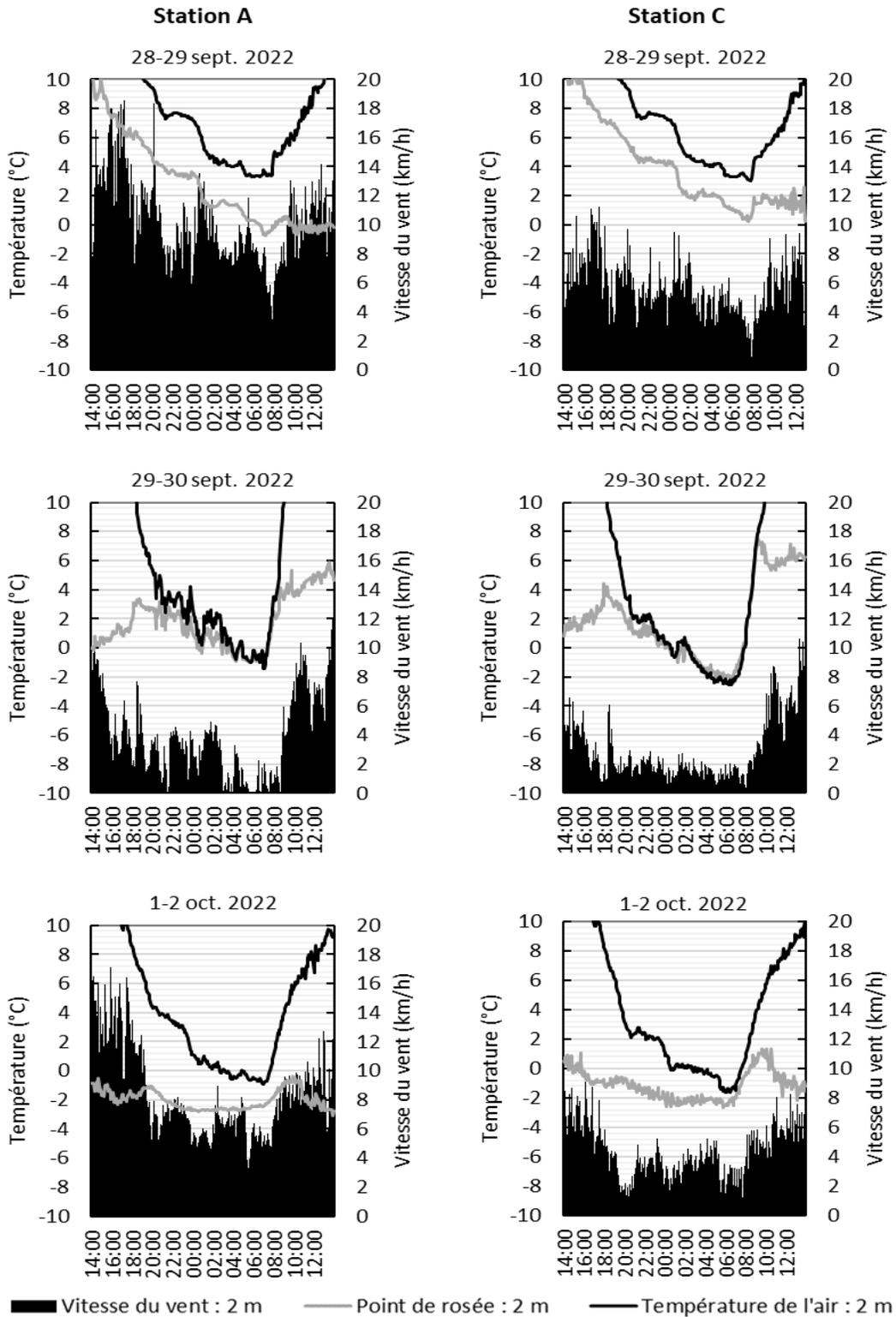


Figure 80. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (5/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

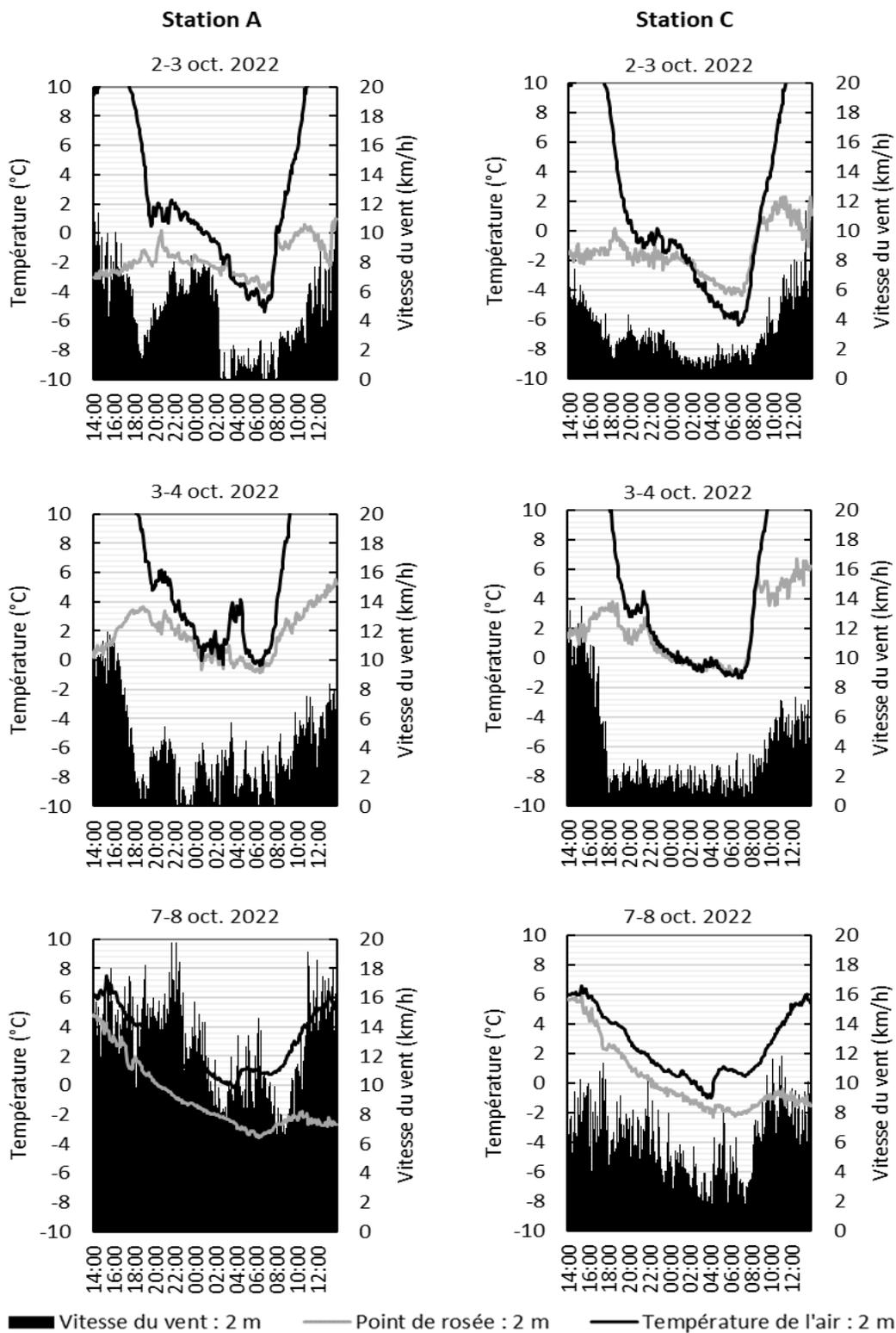


Figure 81. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (6/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

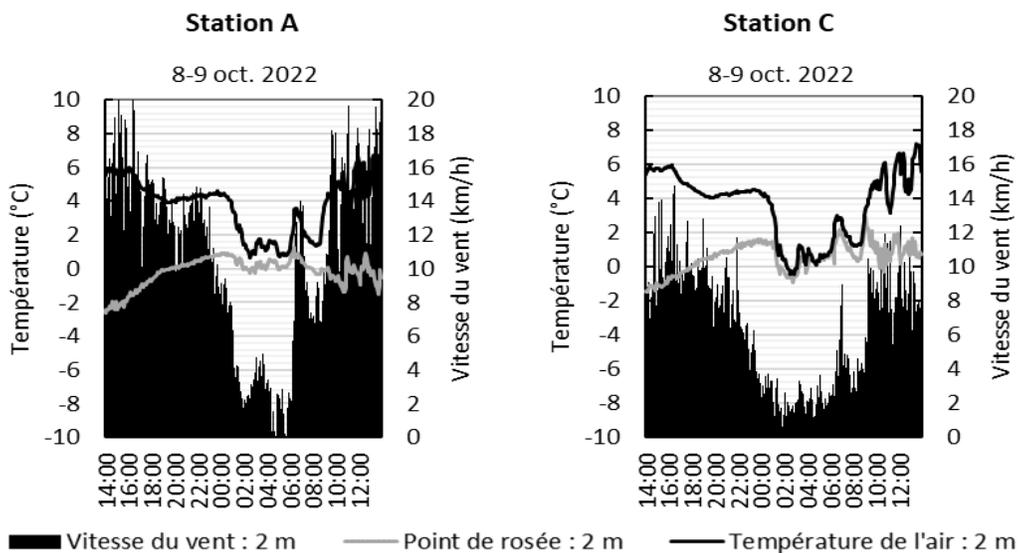


Figure 82. Conditions météorologiques enregistrées aux stations météo A et C lors des épisodes de gel de l'automne 2022 (7/7). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

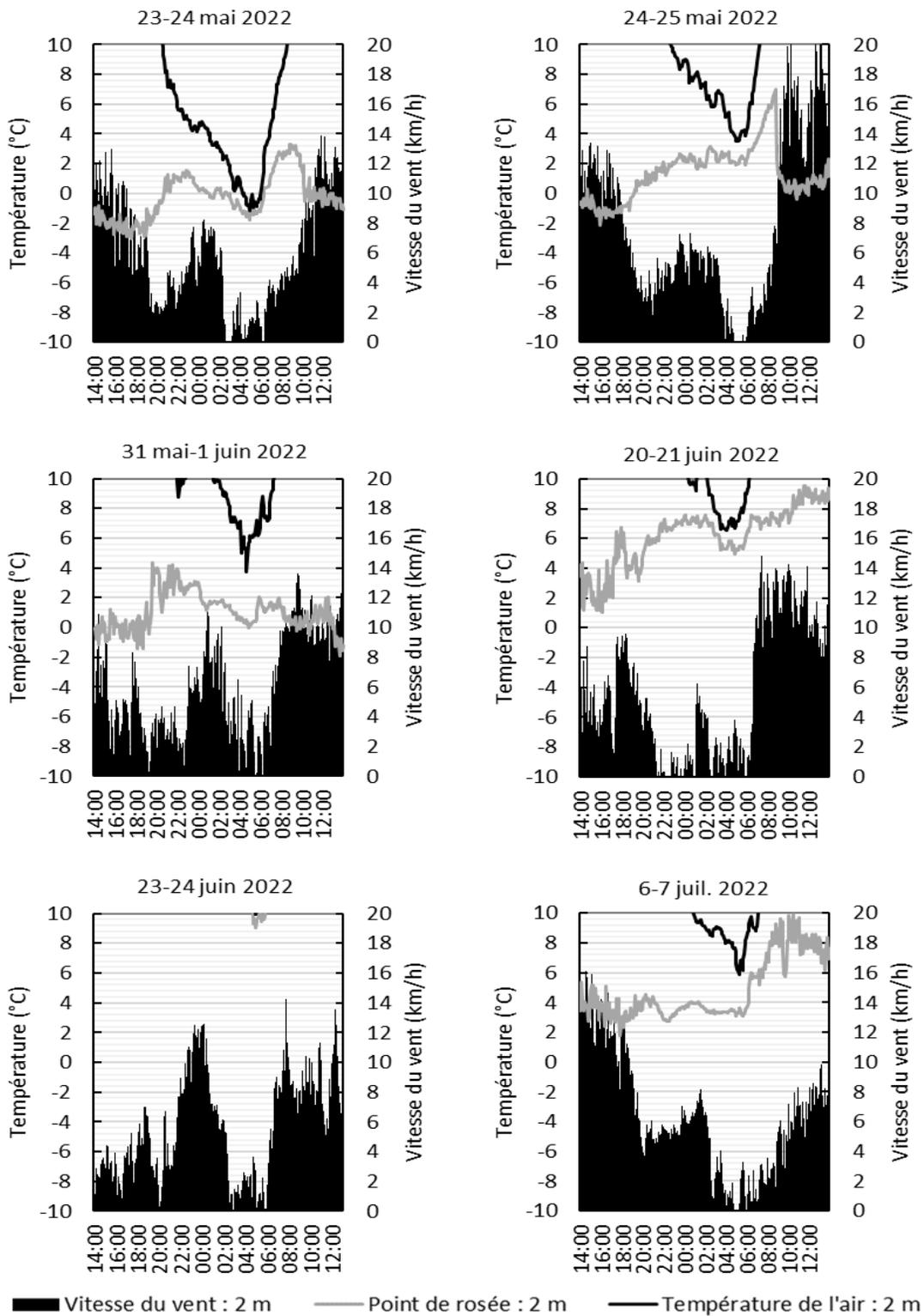


Figure 83. Conditions météorologiques enregistrées à la station météo A lors des épisodes de gel du printemps 2022 (1/2). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

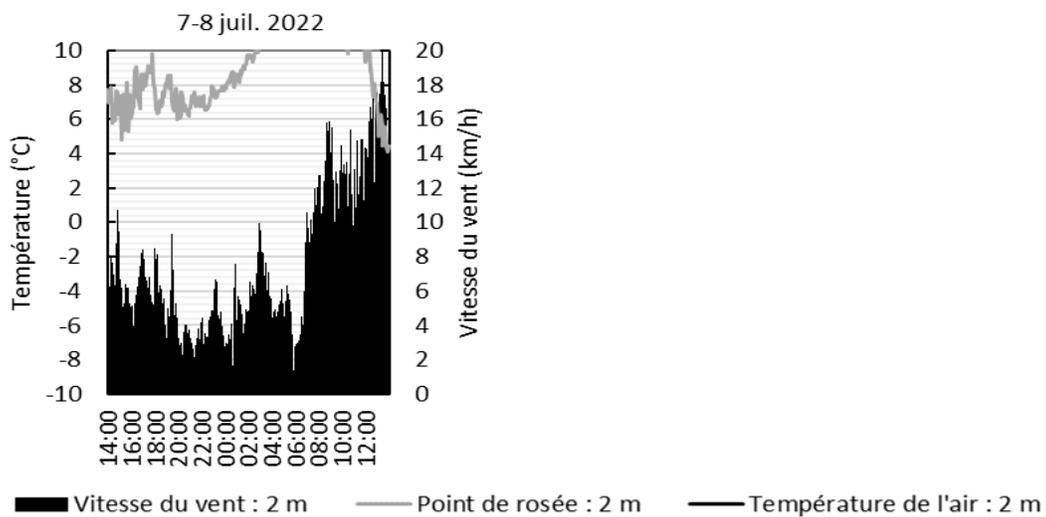


Figure 84. Conditions météorologiques enregistrées à la station météo A lors des épisodes de gel du printemps 2022 (2/2). Vitesse du vent à 2 m (km/h), point de rosée et température de l'air à 2 m (°C).

Annexe 4. Profil vertical des températures

Machine à vent

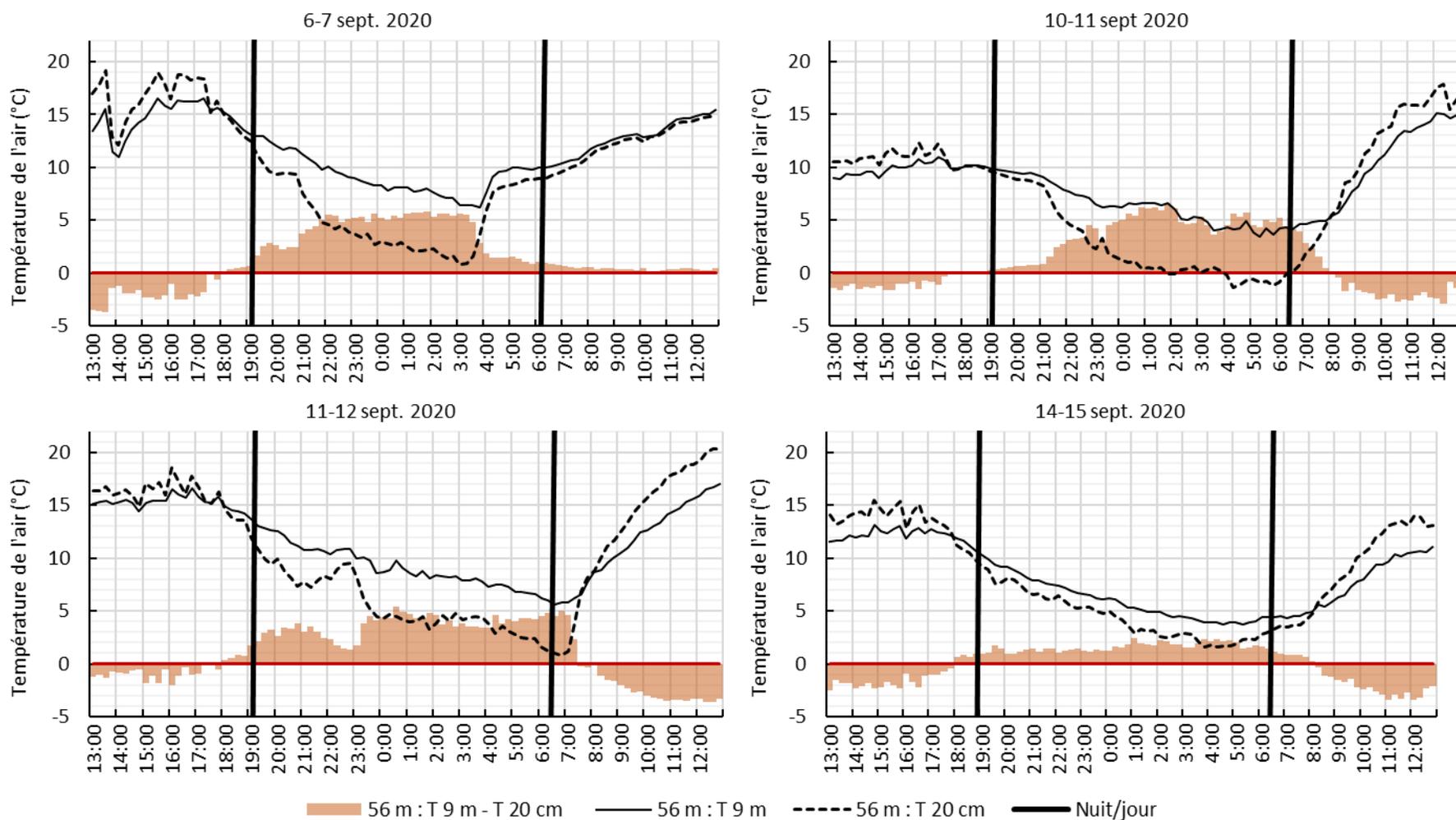


Figure 85. Au site « machine à vent » 2020, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine.

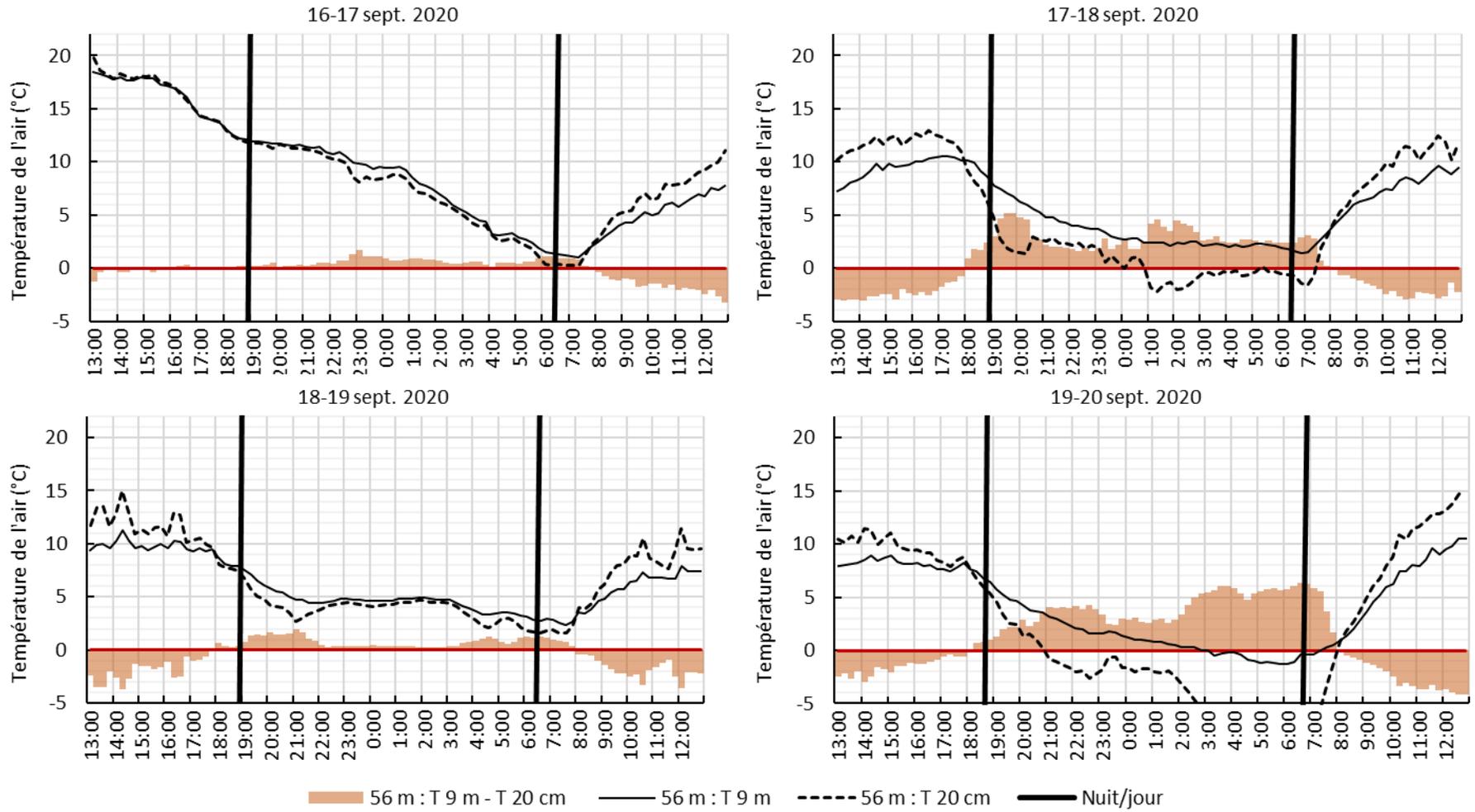


Figure 86. Au site « machine à vent » 2020, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine.

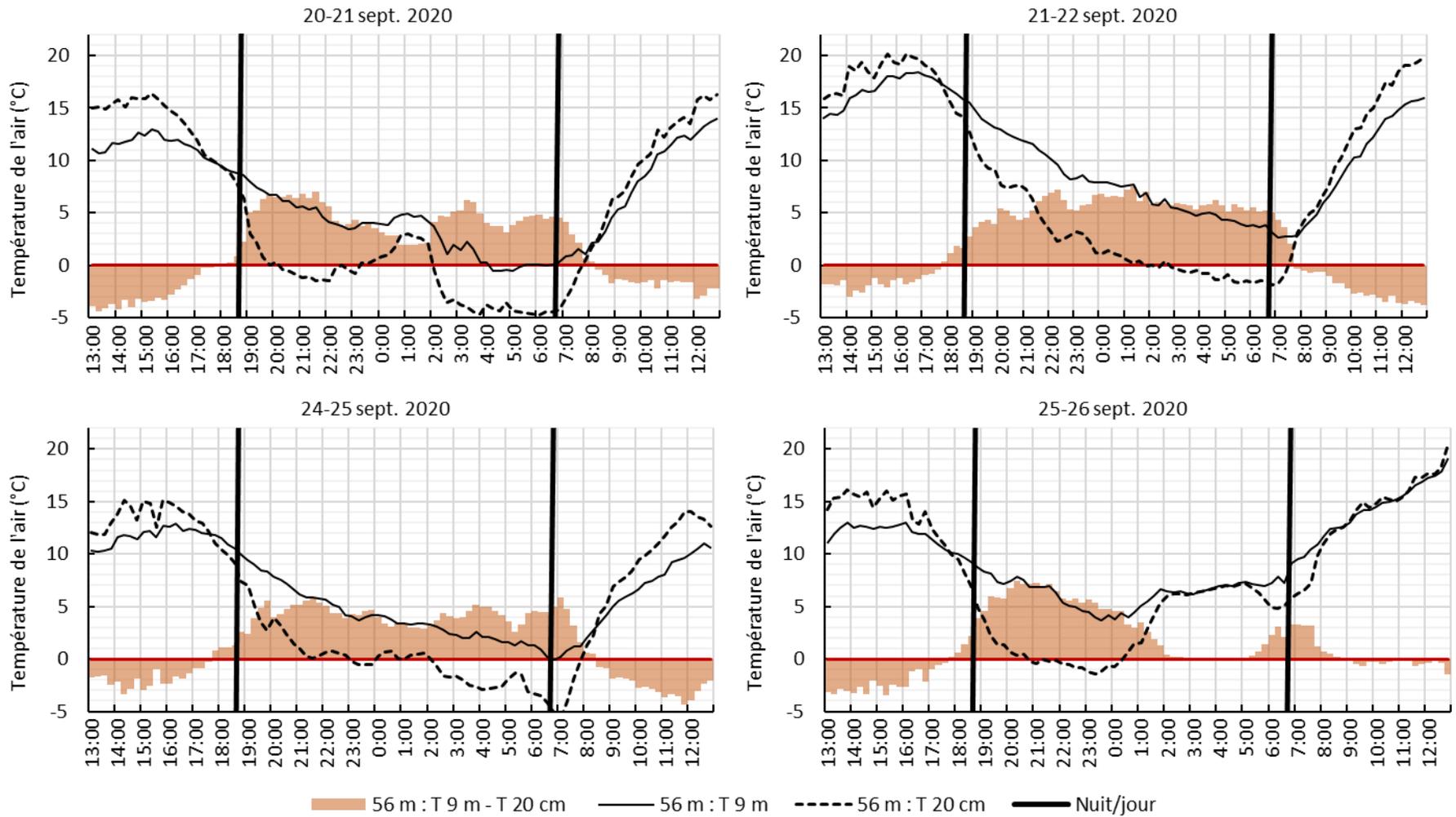


Figure 87. Au site « machine à vent » 2020, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine.

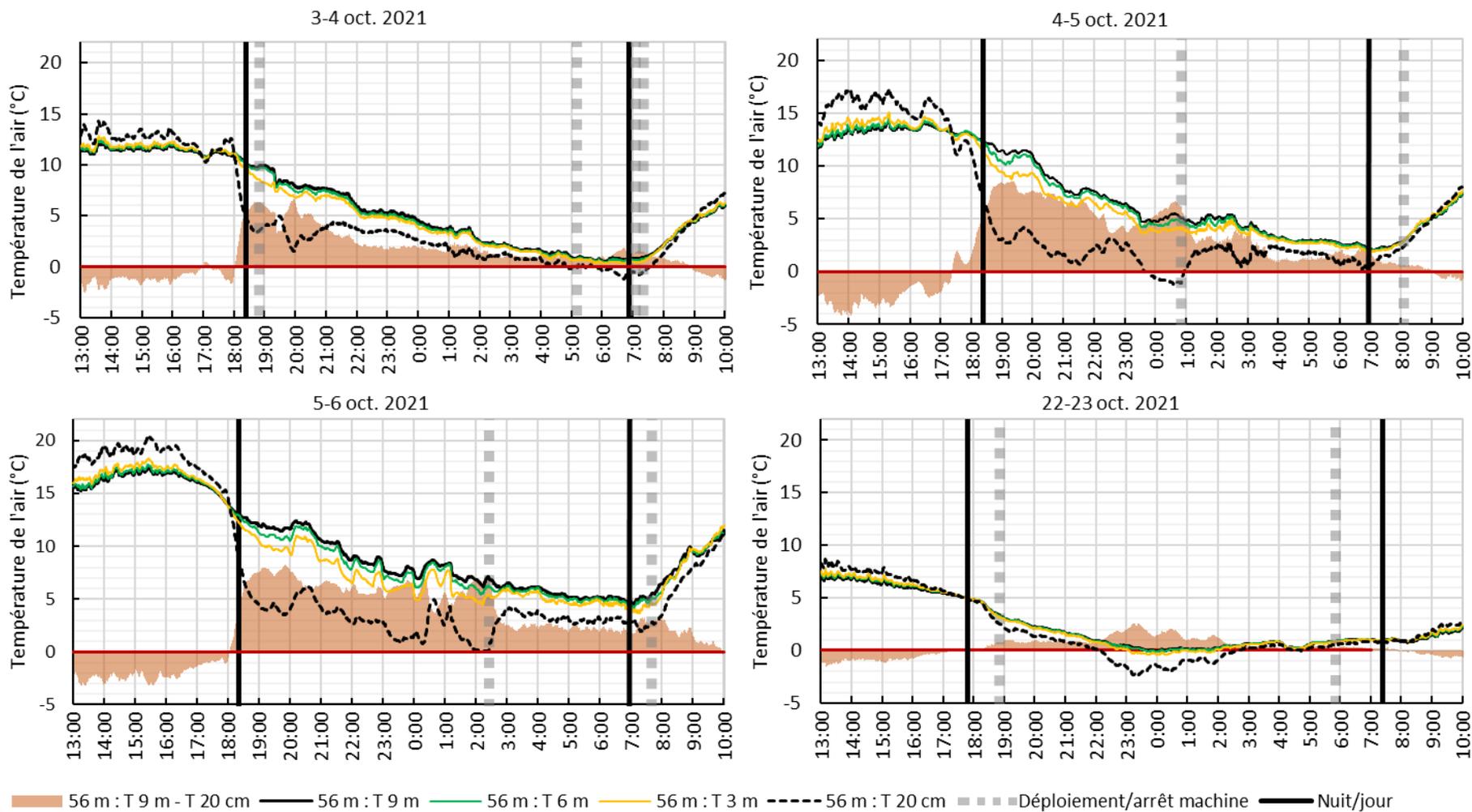


Figure 88. Au site « machine à vent » 2021, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2, 3, 6 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine.

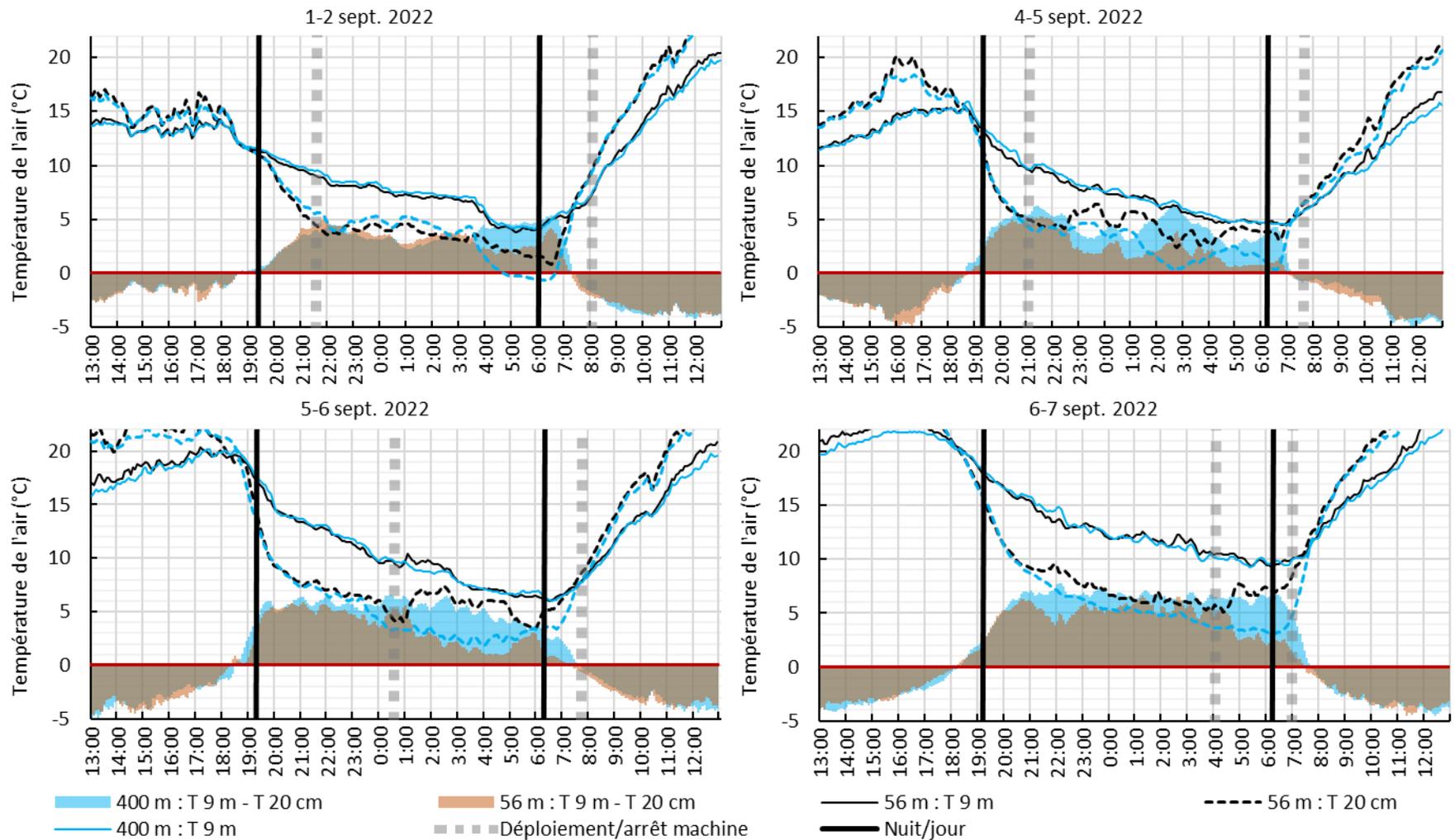


Figure 89. Au site « machine à vent » 2022, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 et 400 m (hors protection) de la machine.

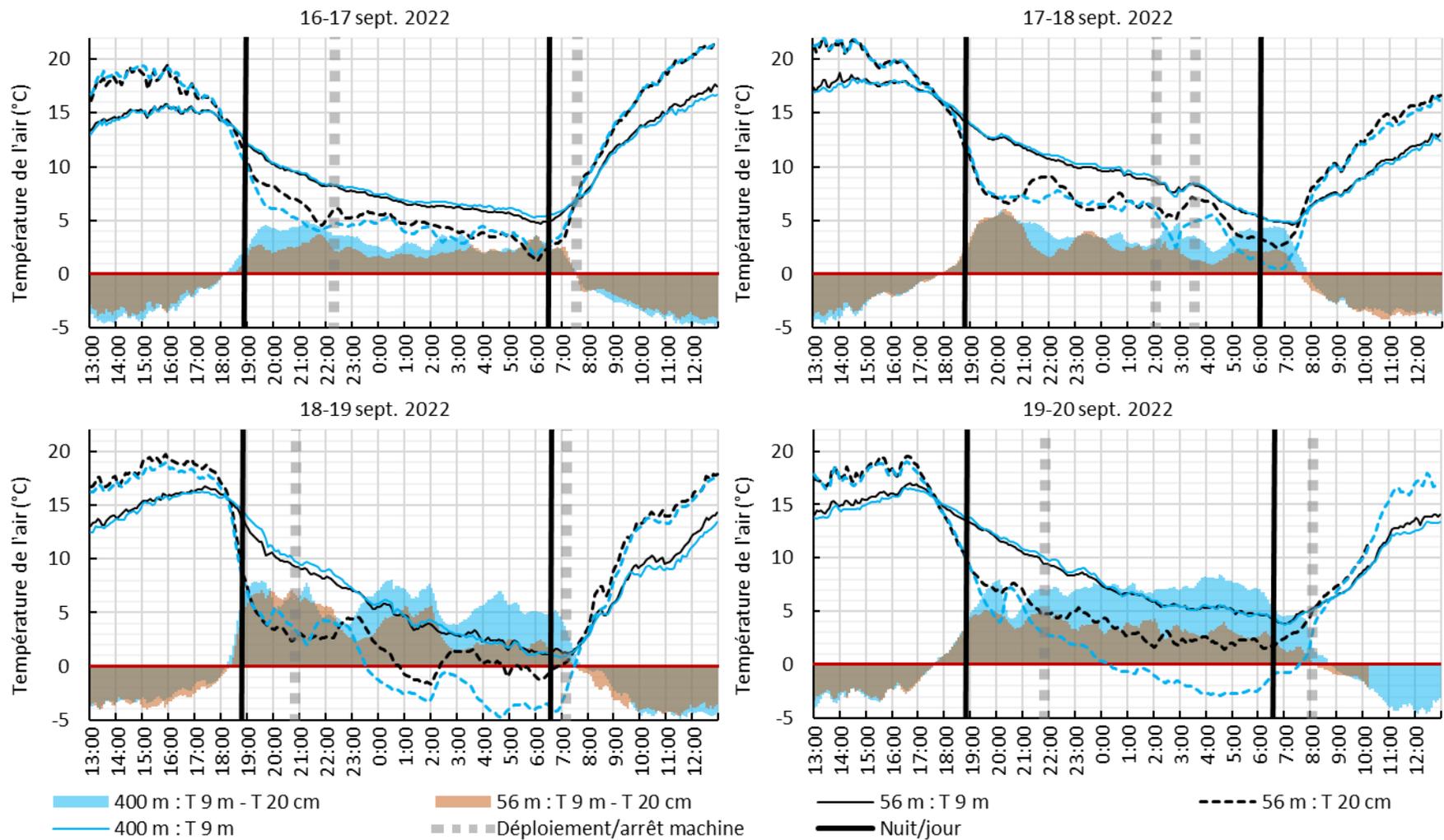


Figure 90. Au site « machine à vent » 2022, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 et 400 m (hors protection) de la machine.

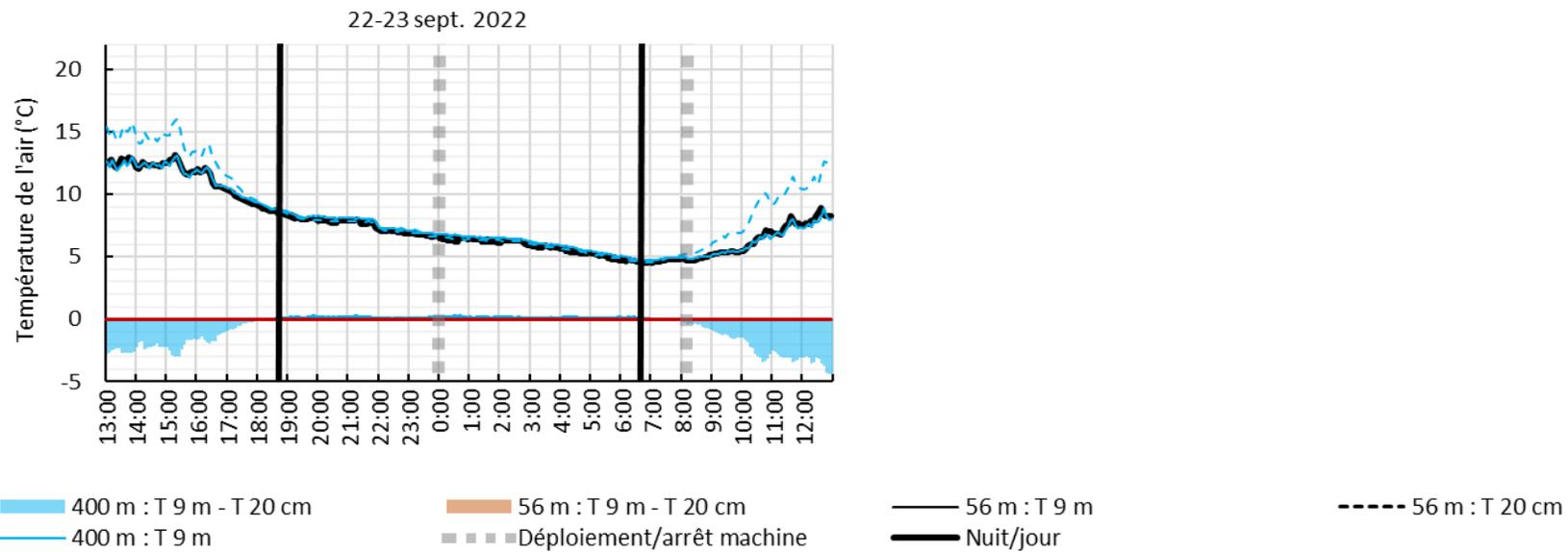


Figure 91. Au site « machine à vent » 2022, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 et 400 m (hors protection) de la machine.

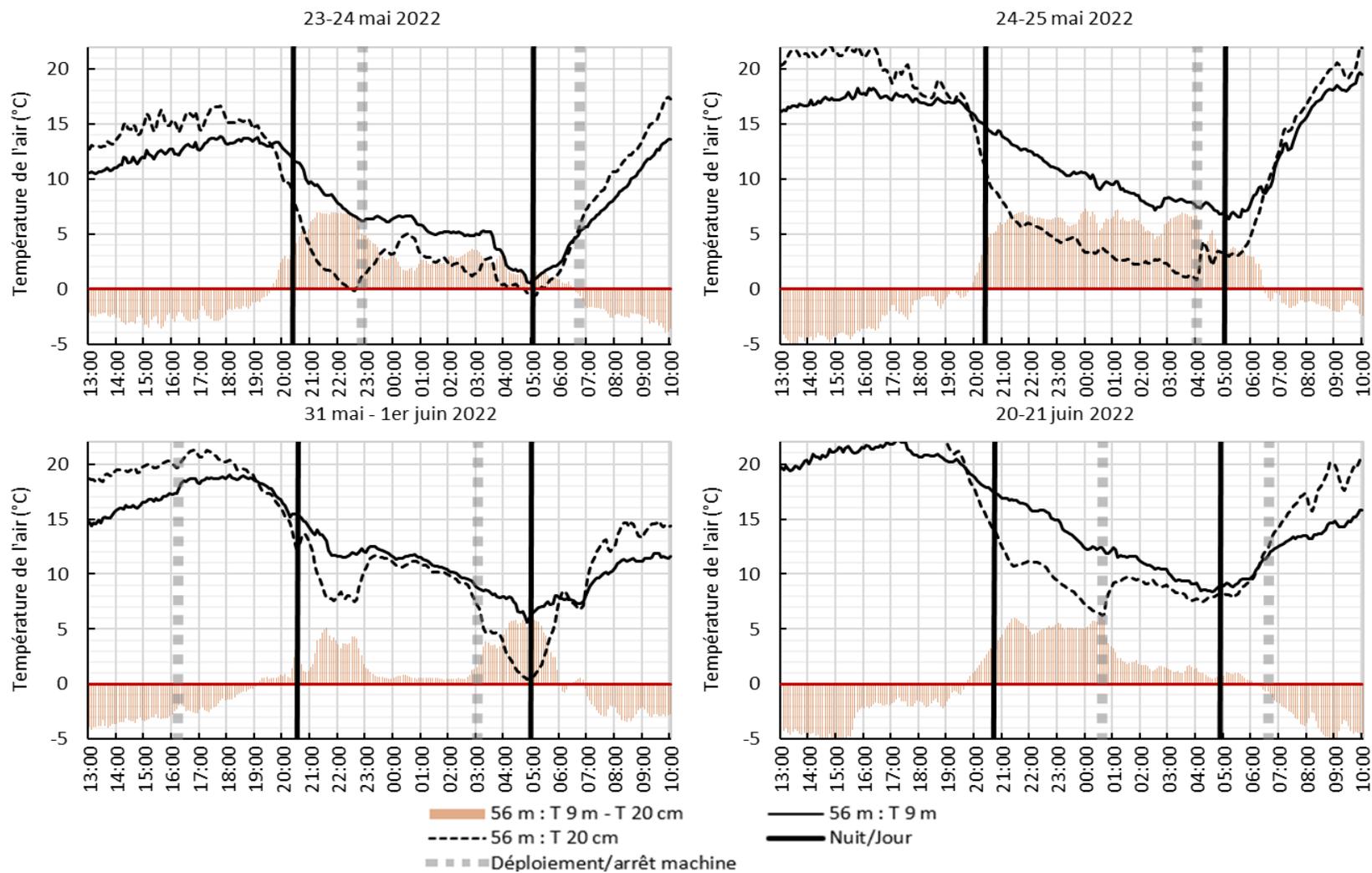


Figure 92. Au site « machine à vent » 2022 au printemps, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine.

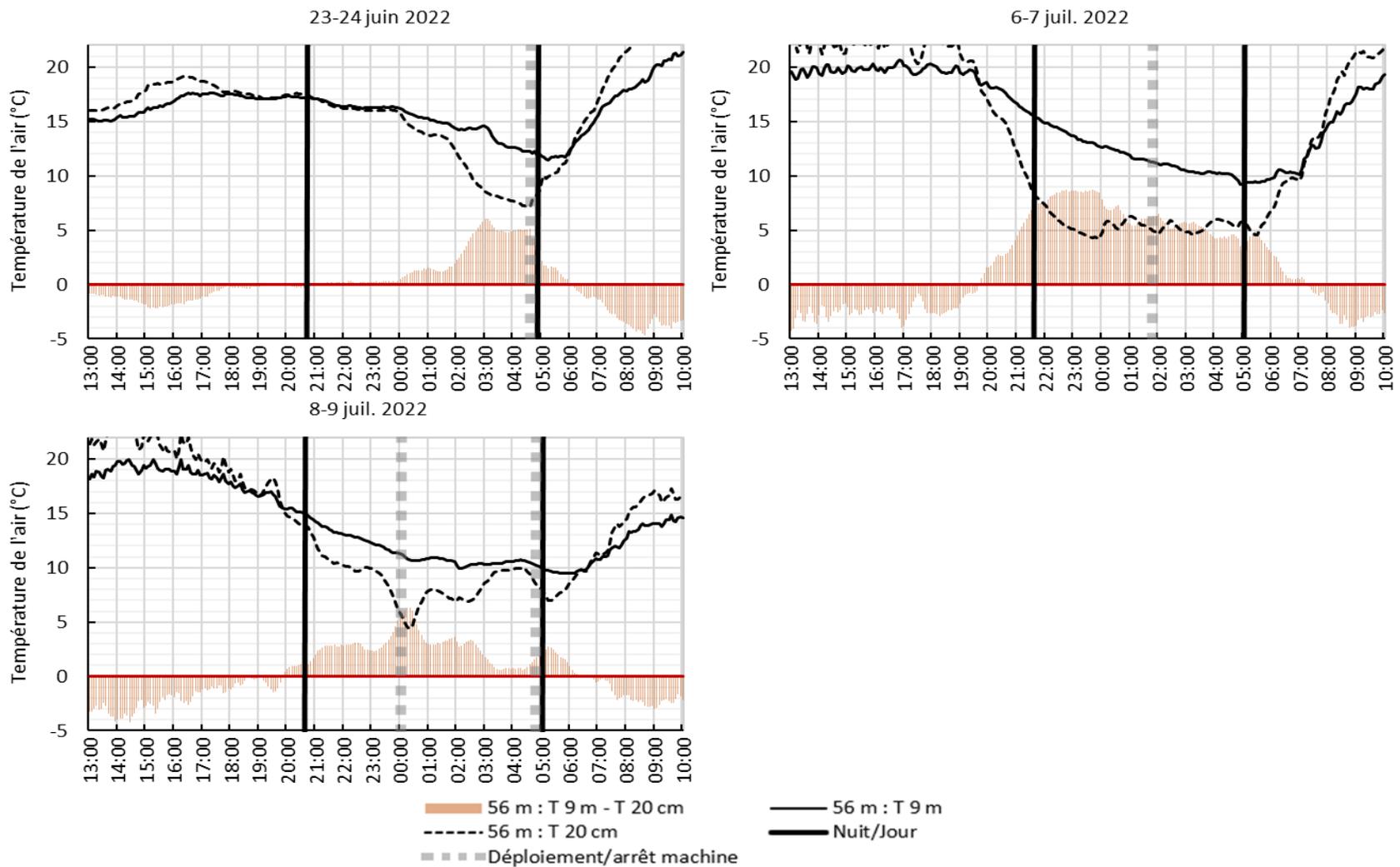


Figure 93. Au site « machine à vent » 2022 au printemps, températures de l'air (°C) mesurées à 0,2 et 9 m de hauteur à une distance de 56 m de la machine

Annexe 5. Graphiques des températures à la hauteur des fruits

Machine à vent

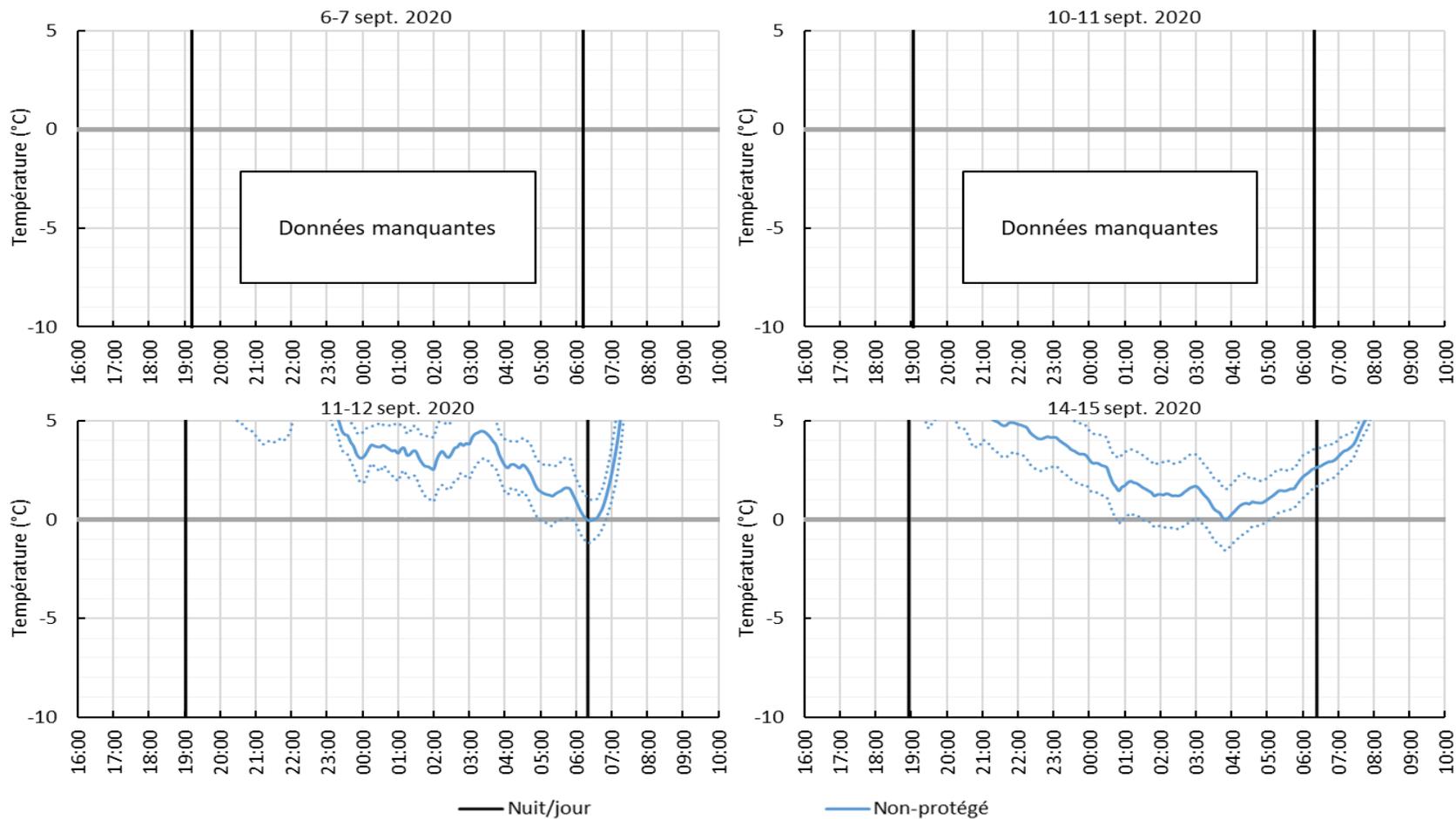


Figure 94. Au site « machine à vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

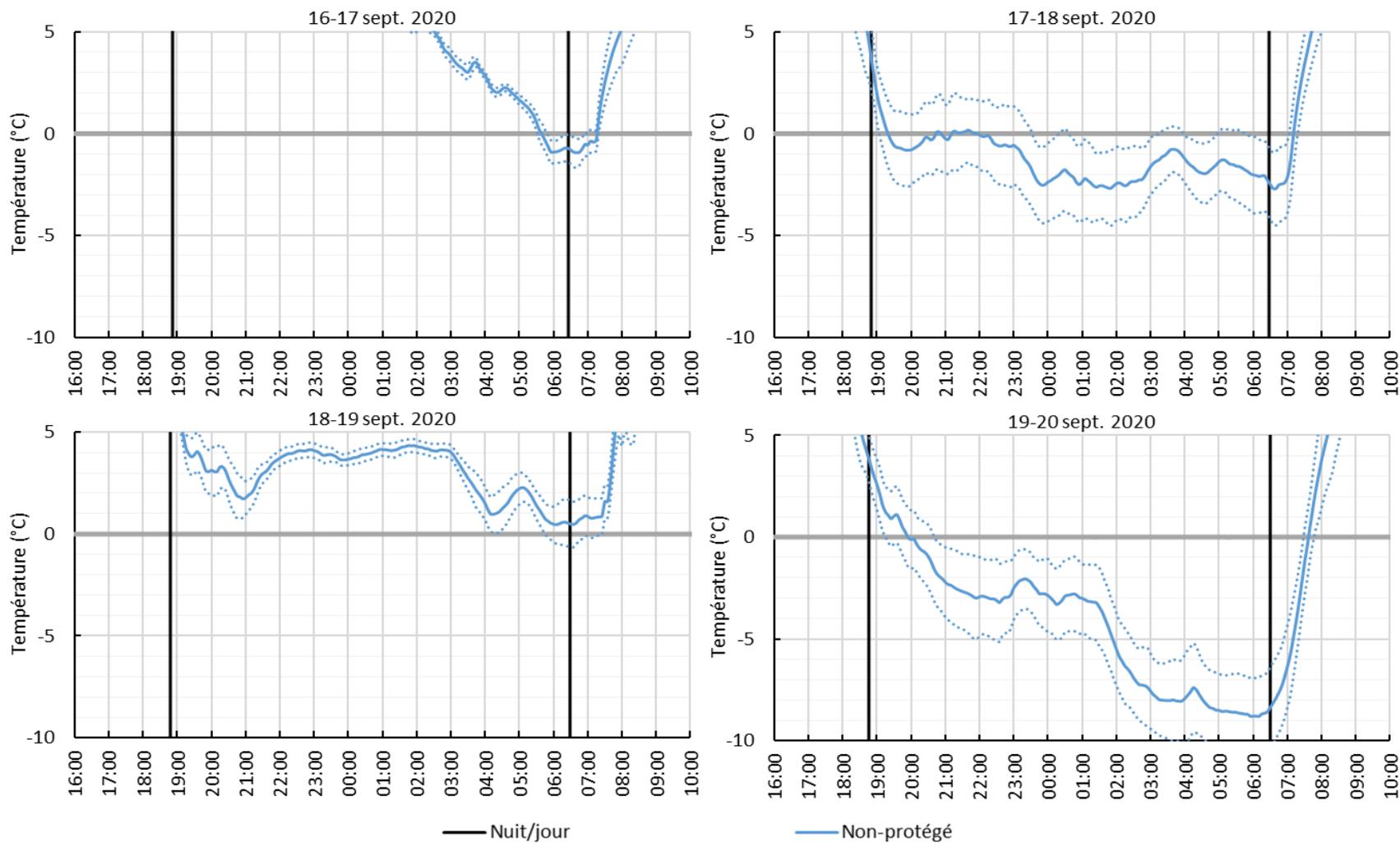


Figure 95. Au site « machine à vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

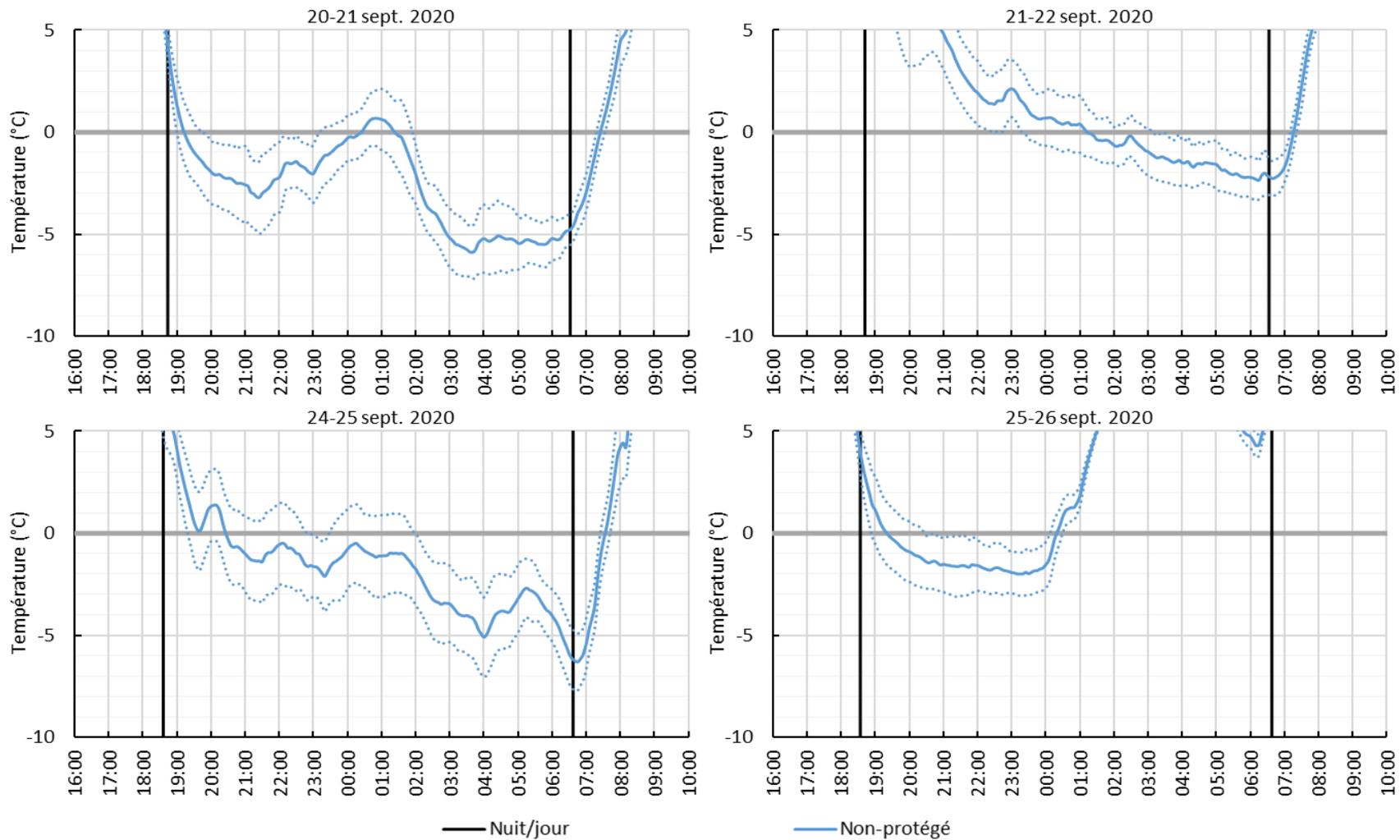


Figure 96. Au site « machine à vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

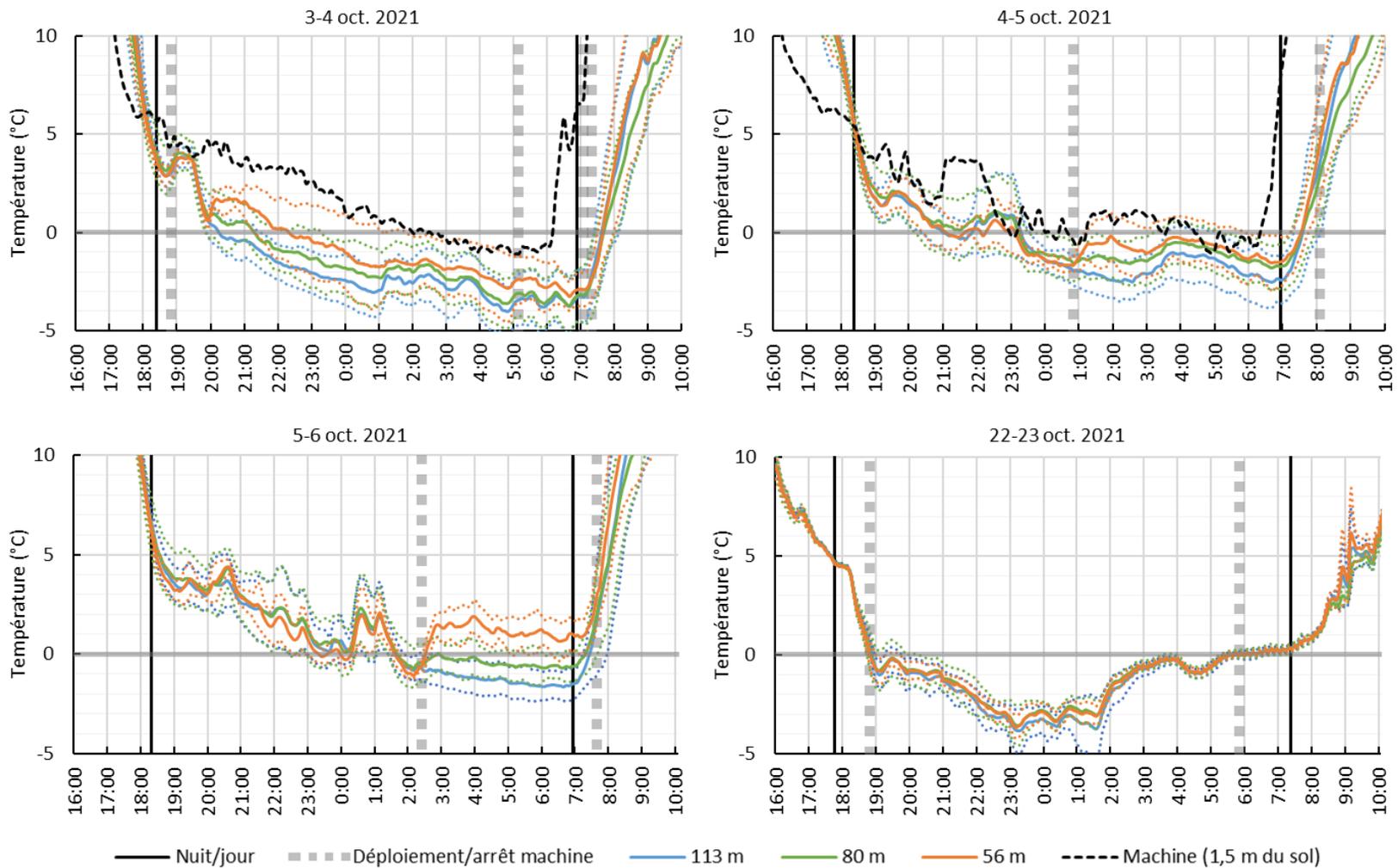


Figure 97. Au site « machine à vent » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

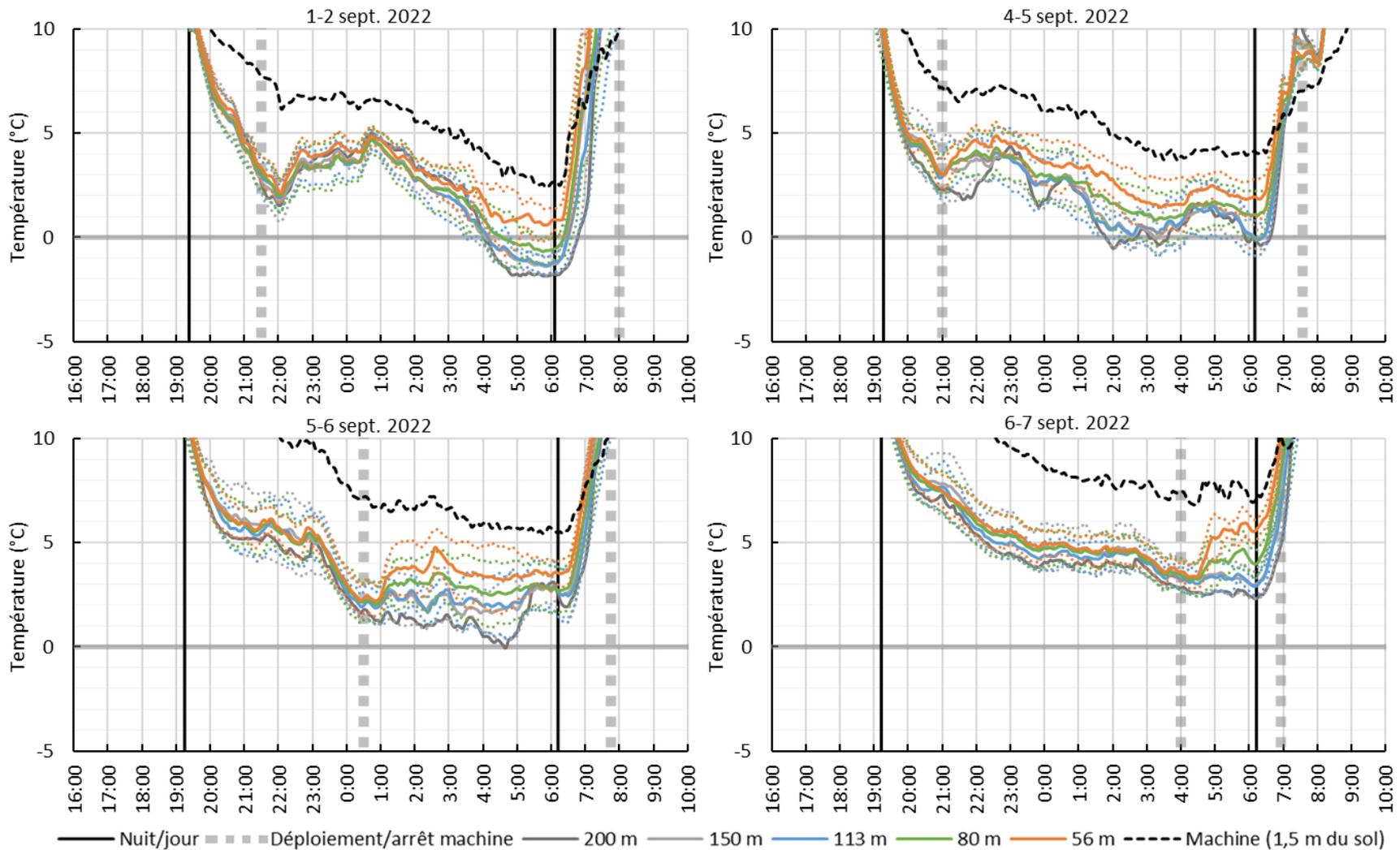


Figure 98. Au site « machine à vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits et à la sonde de température de la machine à 1,5 m (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

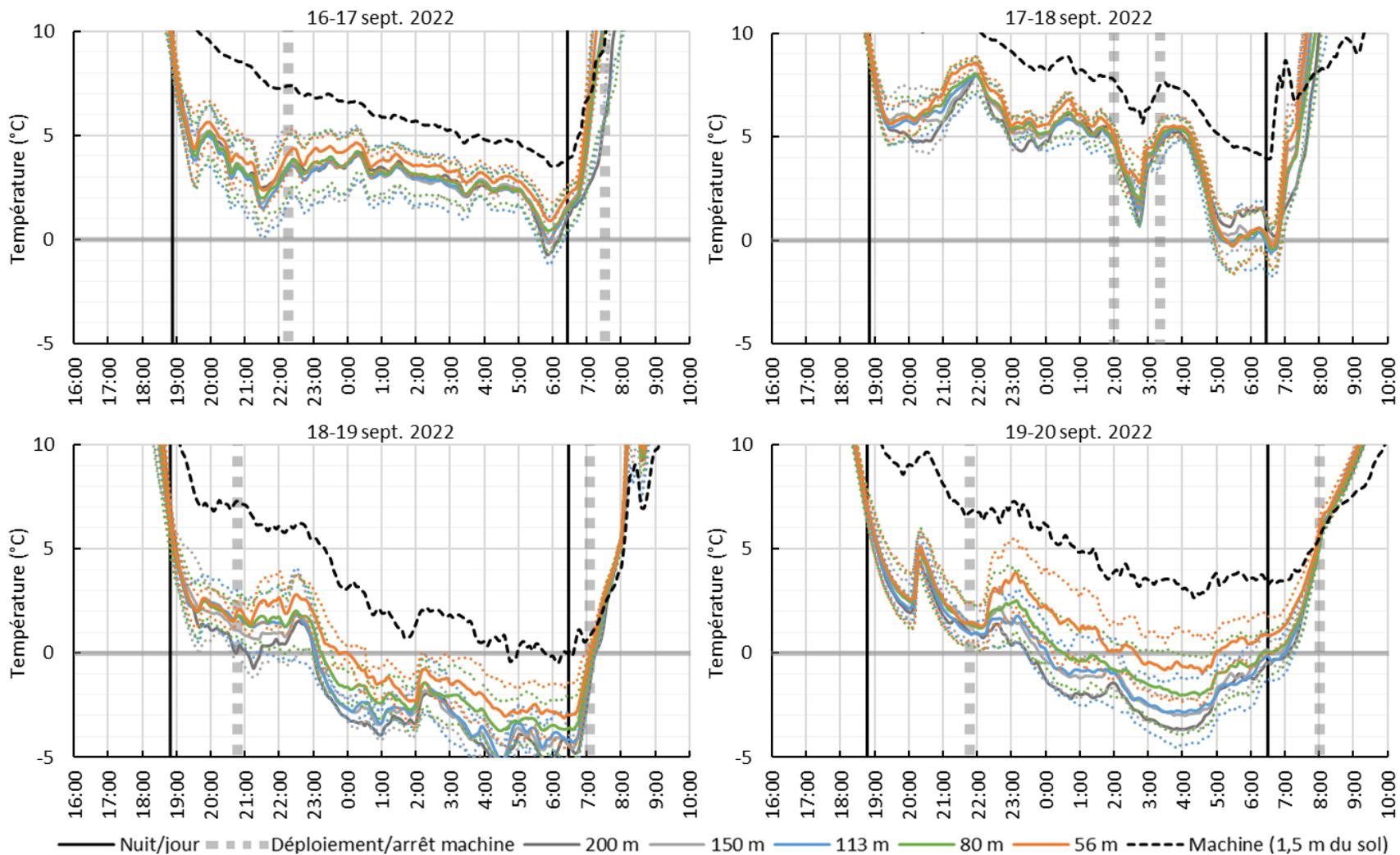


Figure 99. Au site « machine à vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits et à la sonde de température de la machine à 1,5 m (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

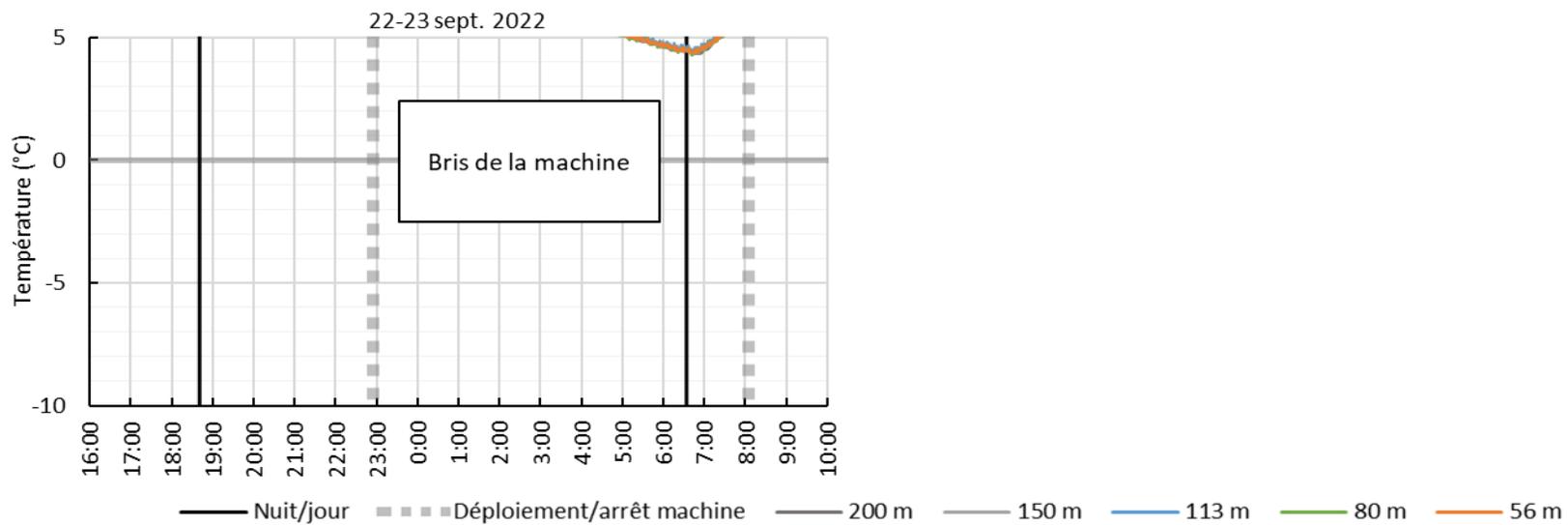


Figure 100. Au site « machine à vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes. Les données sont présentées pour cet épisode même si la machine s'est déployée automatiquement, et qu'il y a eu un bris à heure indéterminée.

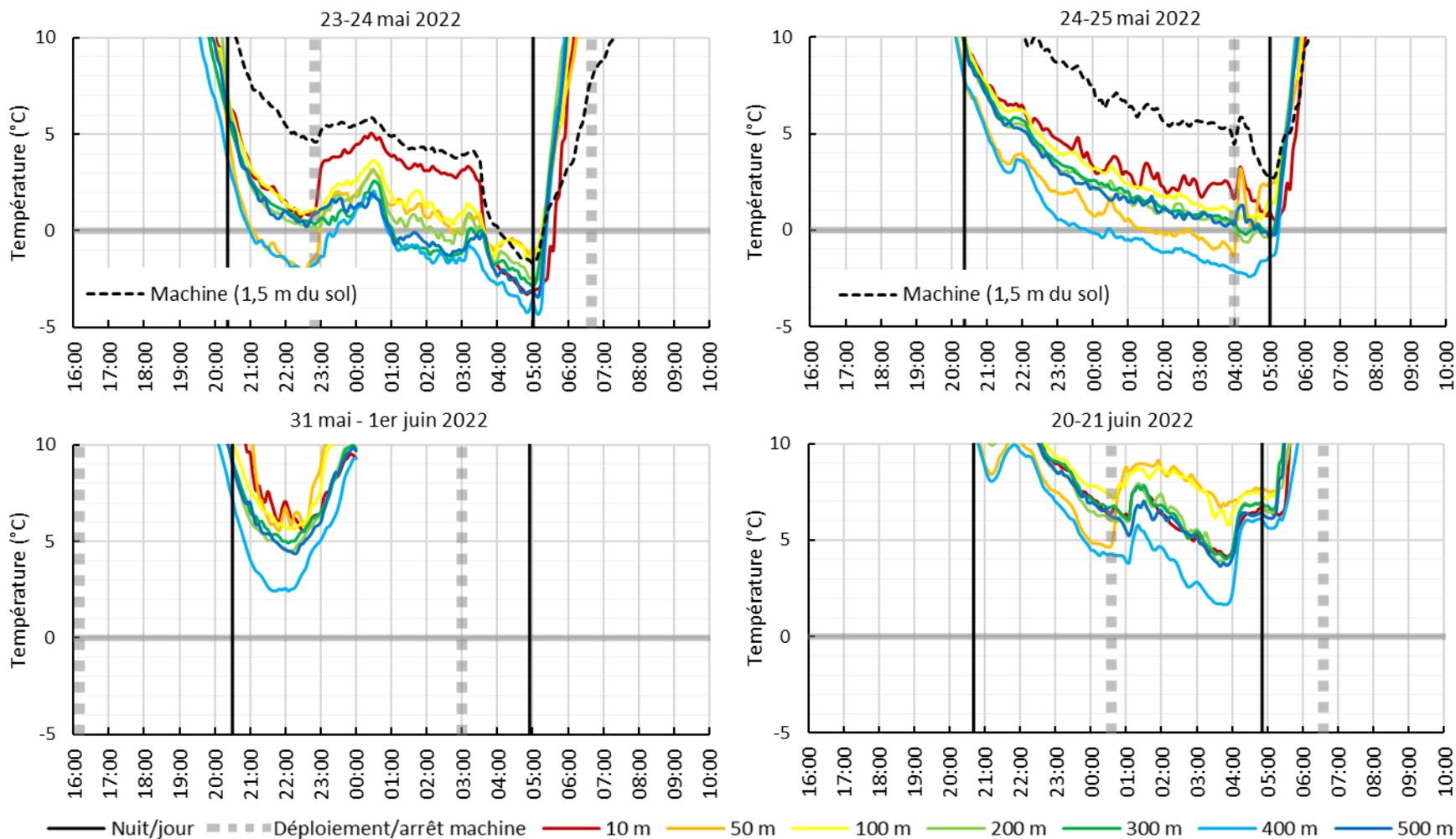


Figure 101. Au site « machine à vent » 2022 au printemps, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits et à la sonde de température de la machine à 1,5 m (°C).

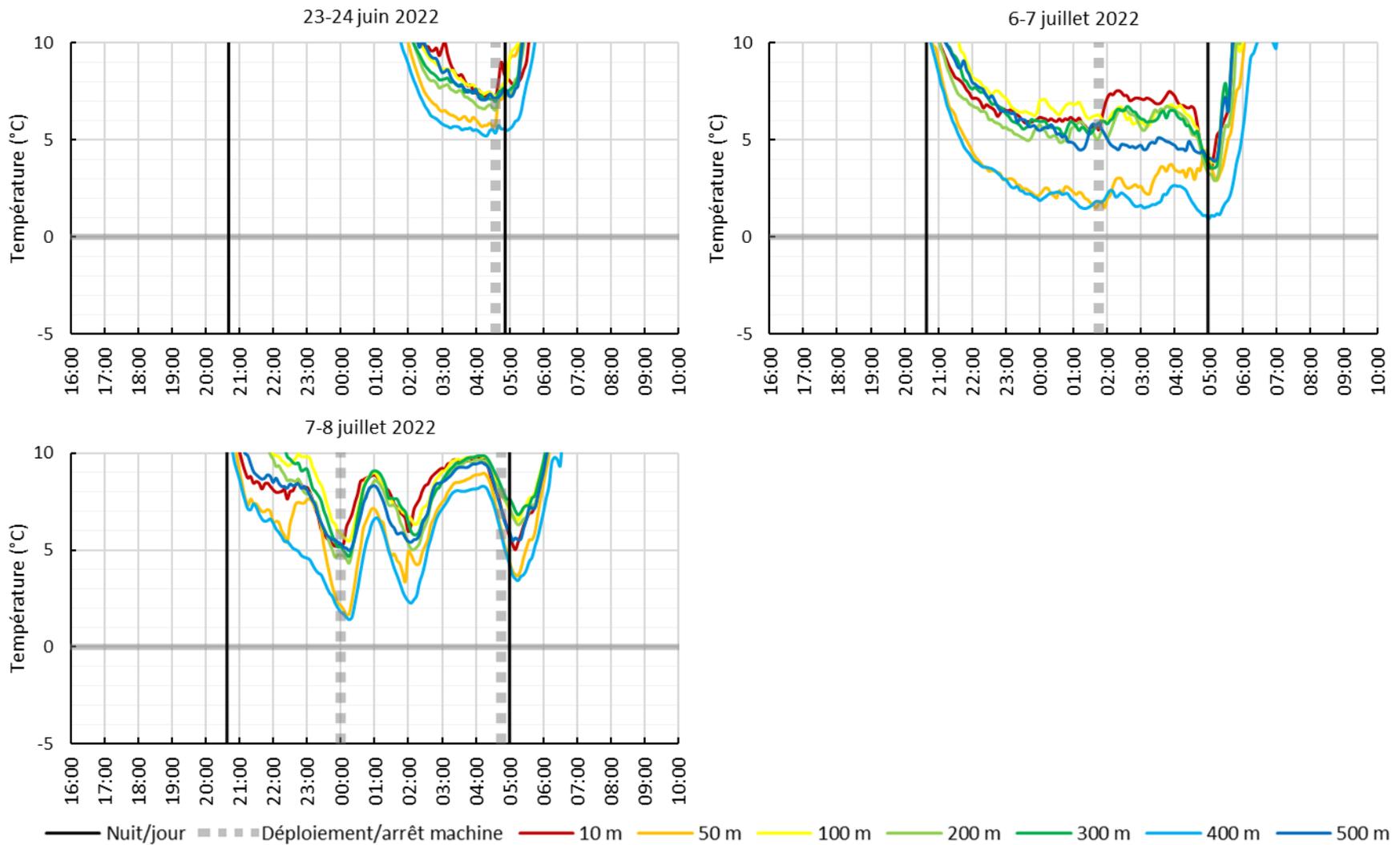


Figure 102. Au site « machine à vent » 2022 au printemps, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C).

Bâche

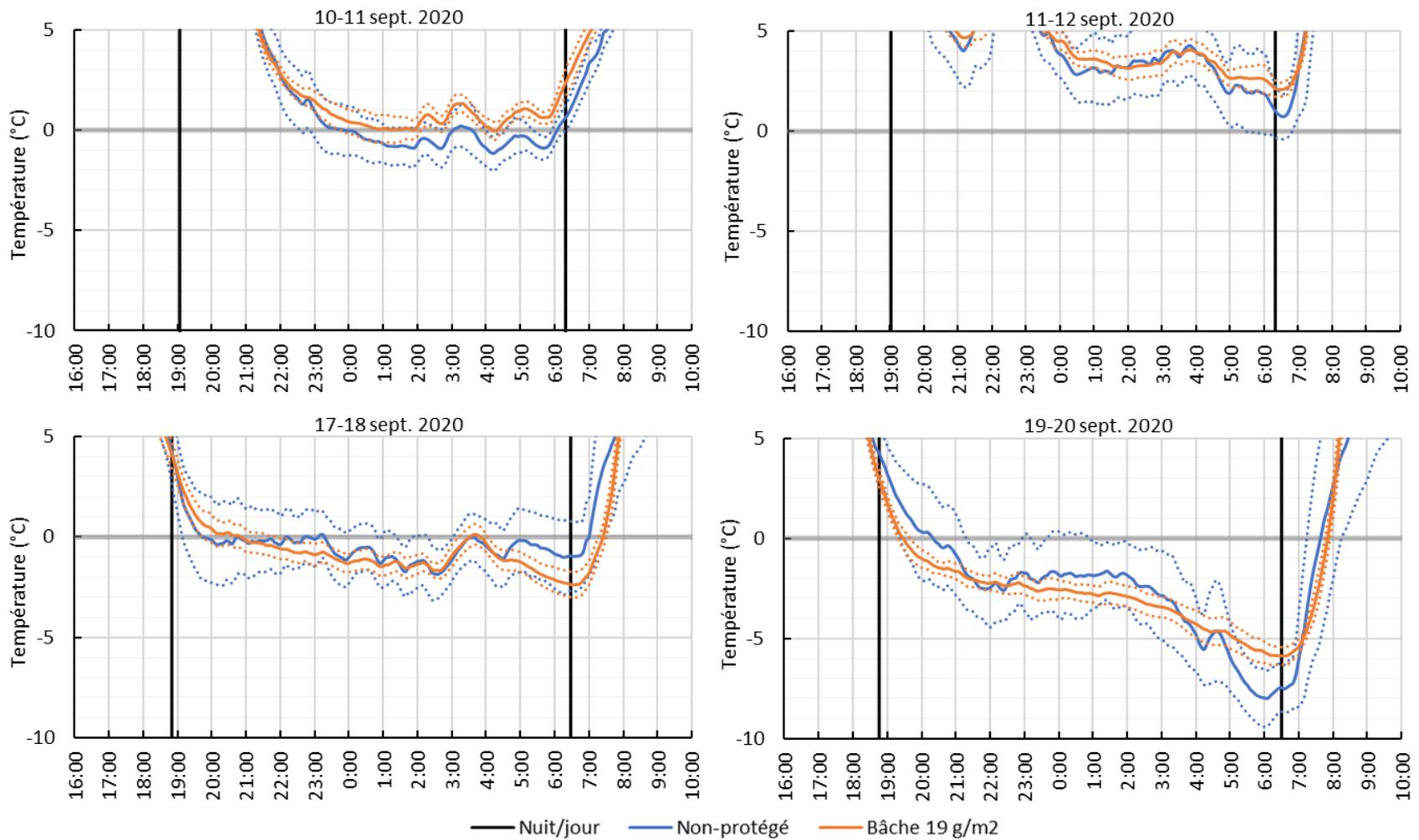


Figure 103. Au site « bâche 19 g/m² » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

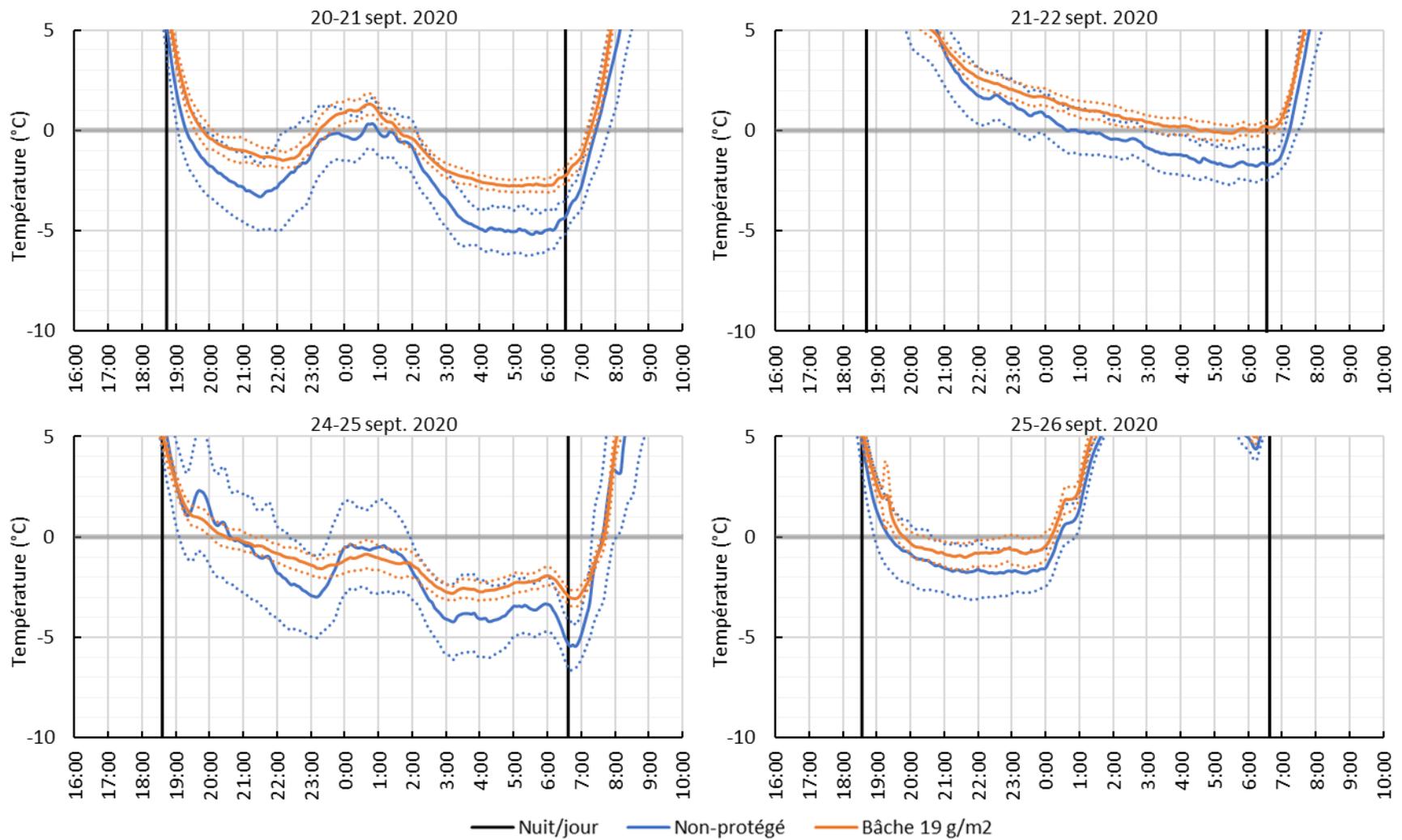


Figure 104. Au site « bâche 19 g/m² » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

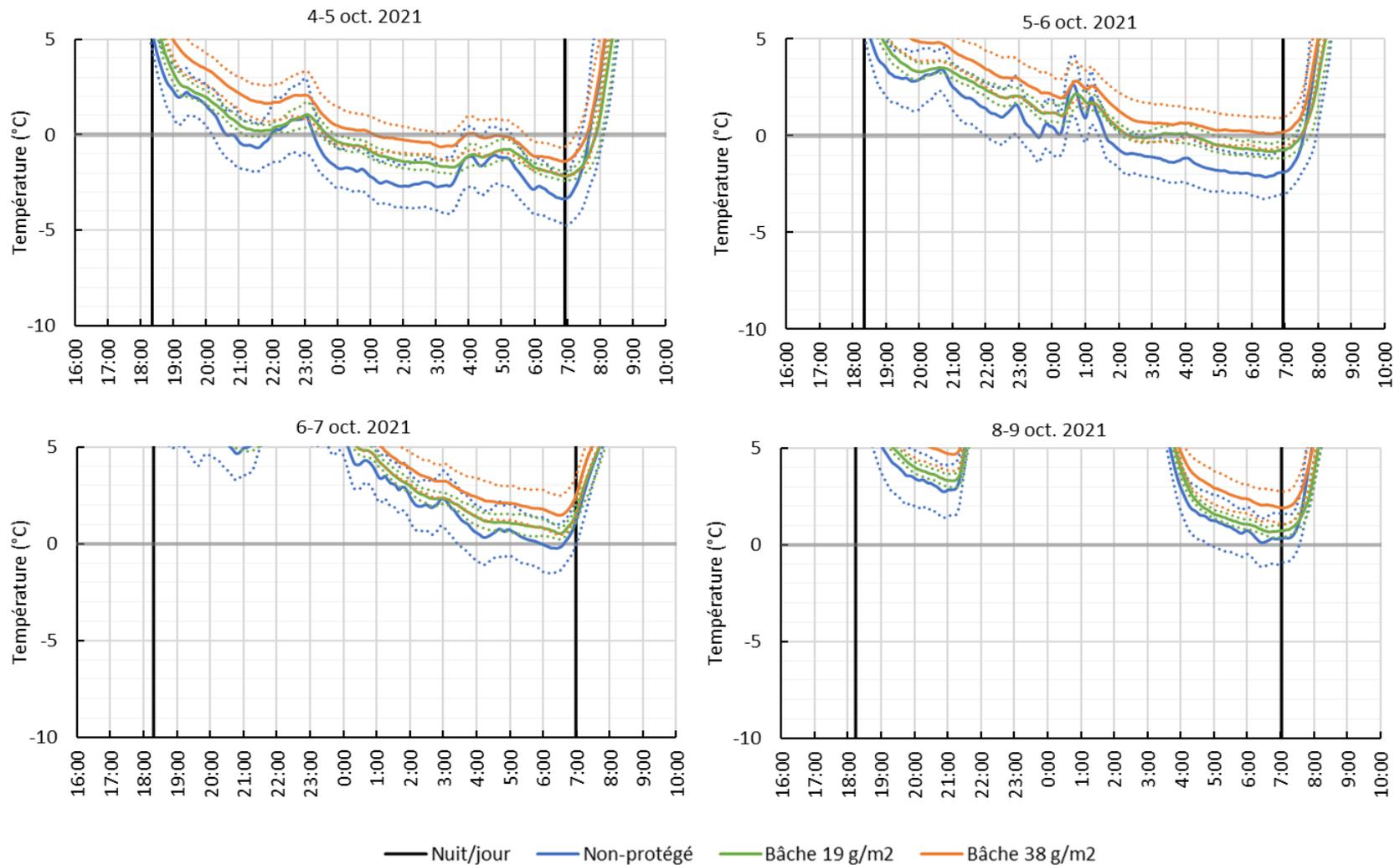
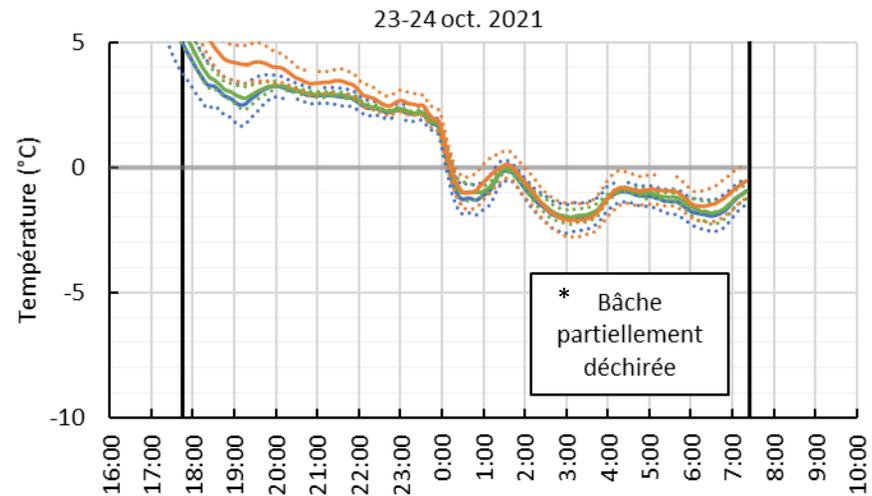
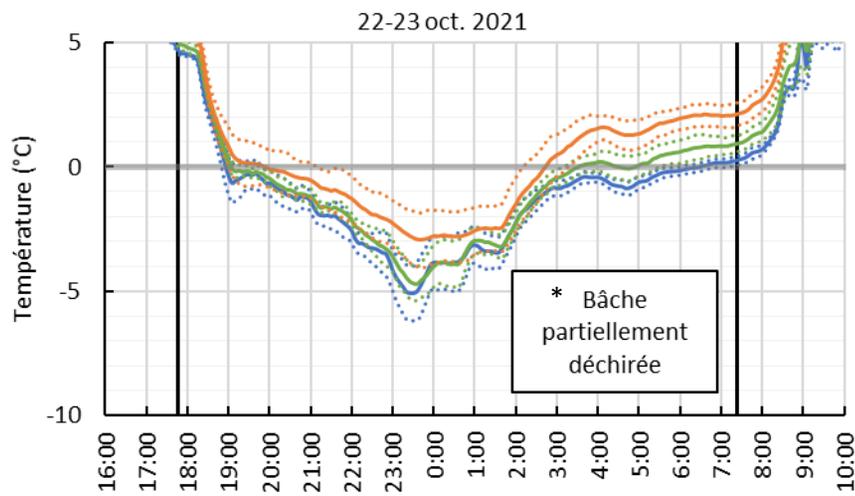


Figure 105. Aux sites « bâche 19 g/m² et « bâche 38 g/m² » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.



— Nuit/jour — Non-protégé — Bâche 19 g/m² — Bâche 38 g/m²

*Pour ces deux dates, la protection de la bâche avec simple épaisseur 19g/m² a échouée, la bâche était déchirée sur la majorité de la longueur.

Figure 106. Aux sites « bâche 19 g/m² et « bâche 38 g/m² » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

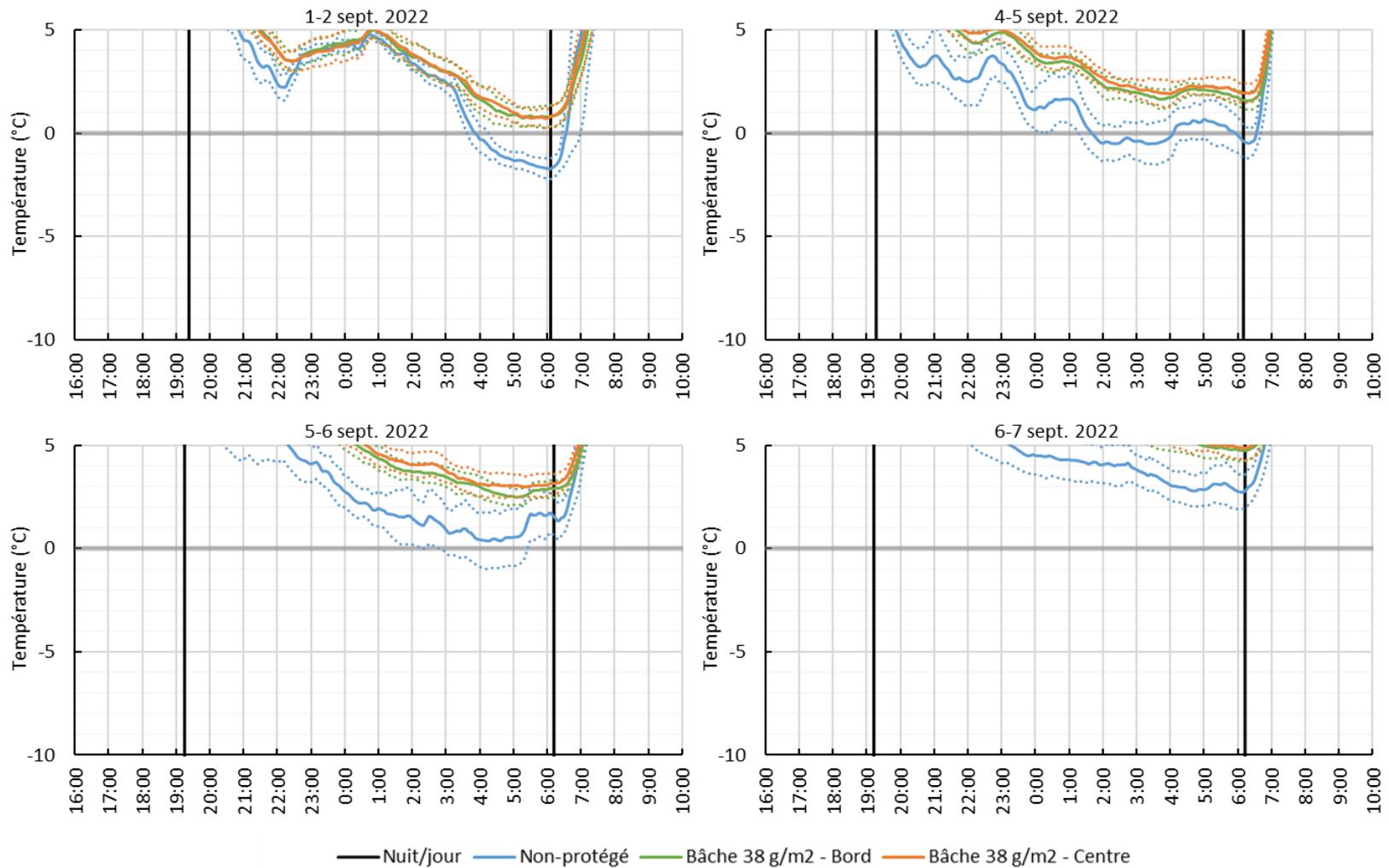


Figure 107. Au site « bâche 38 g/m² » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

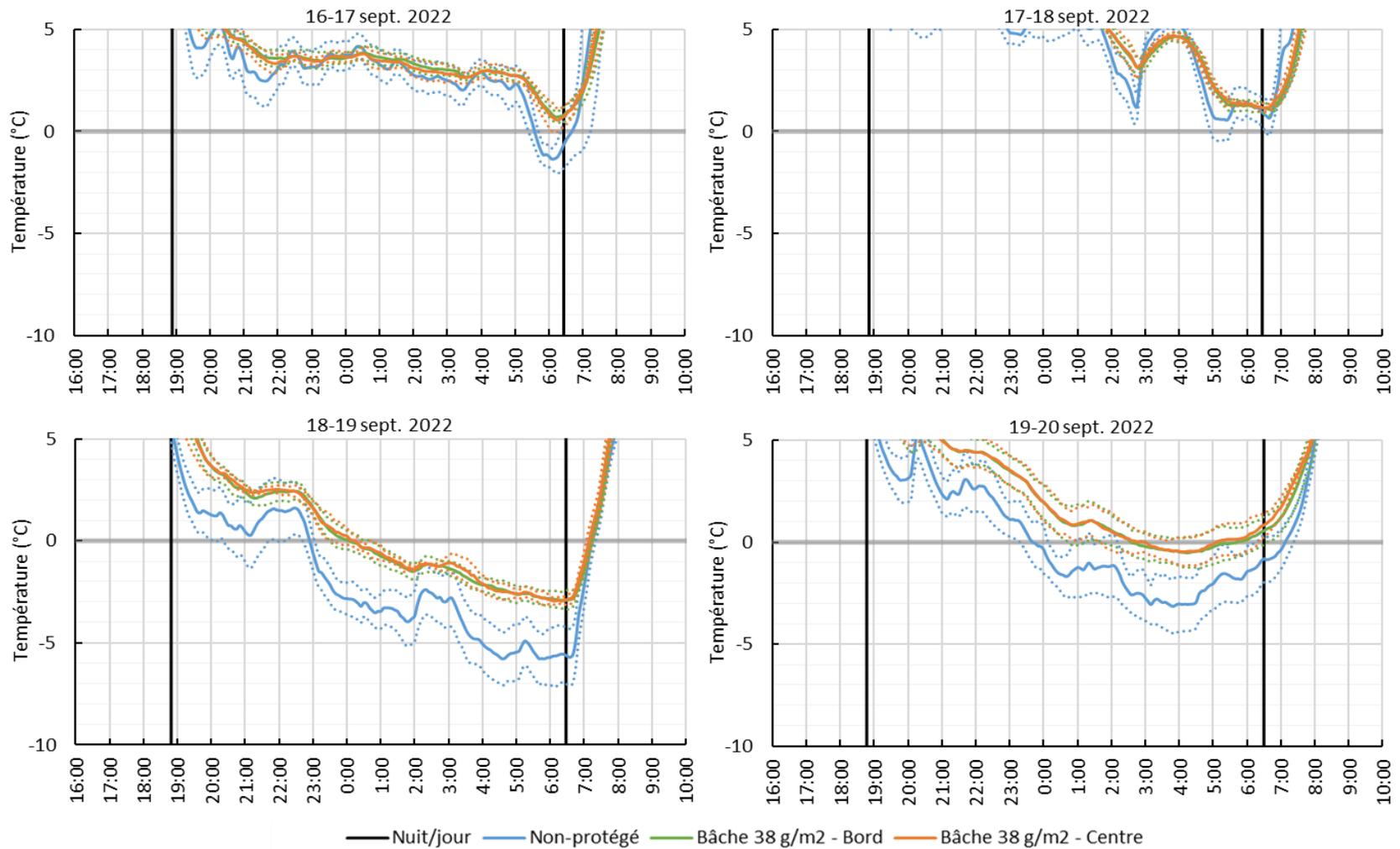


Figure 108. Au site « bâche 38 g/m² » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

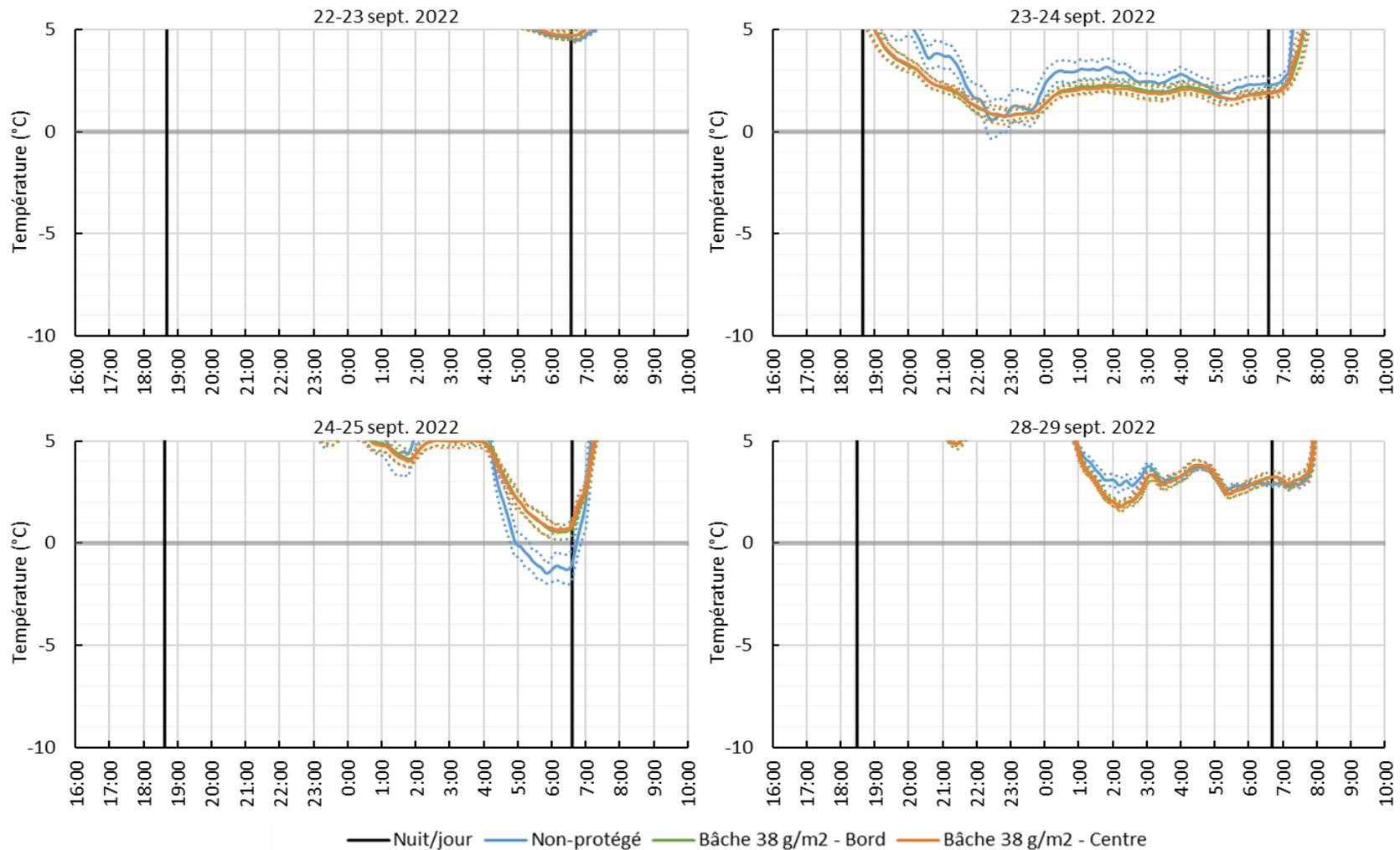


Figure 109. Au site « bâche 38 g/m² » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

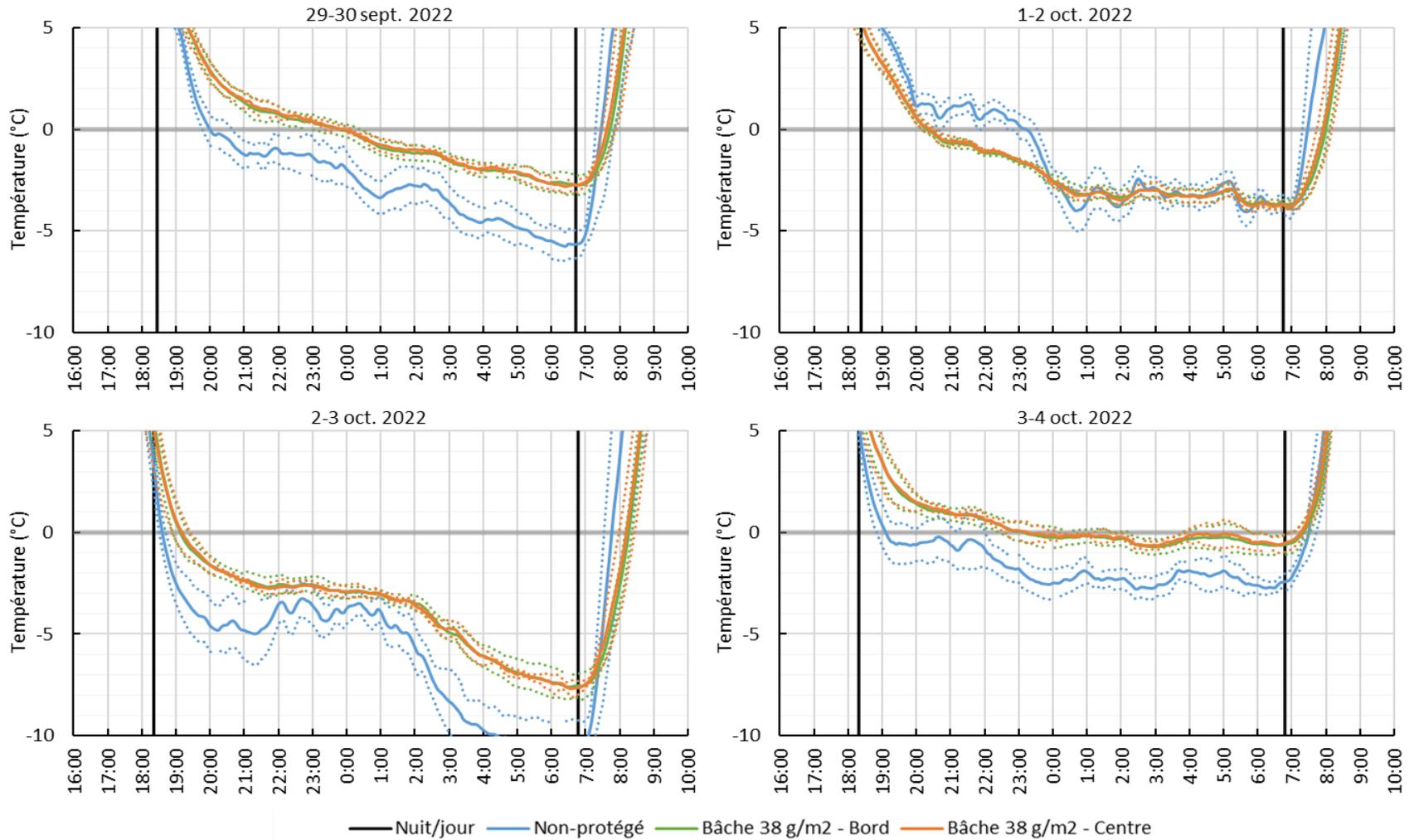


Figure 110. Au site « bâche 38 g/m² » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

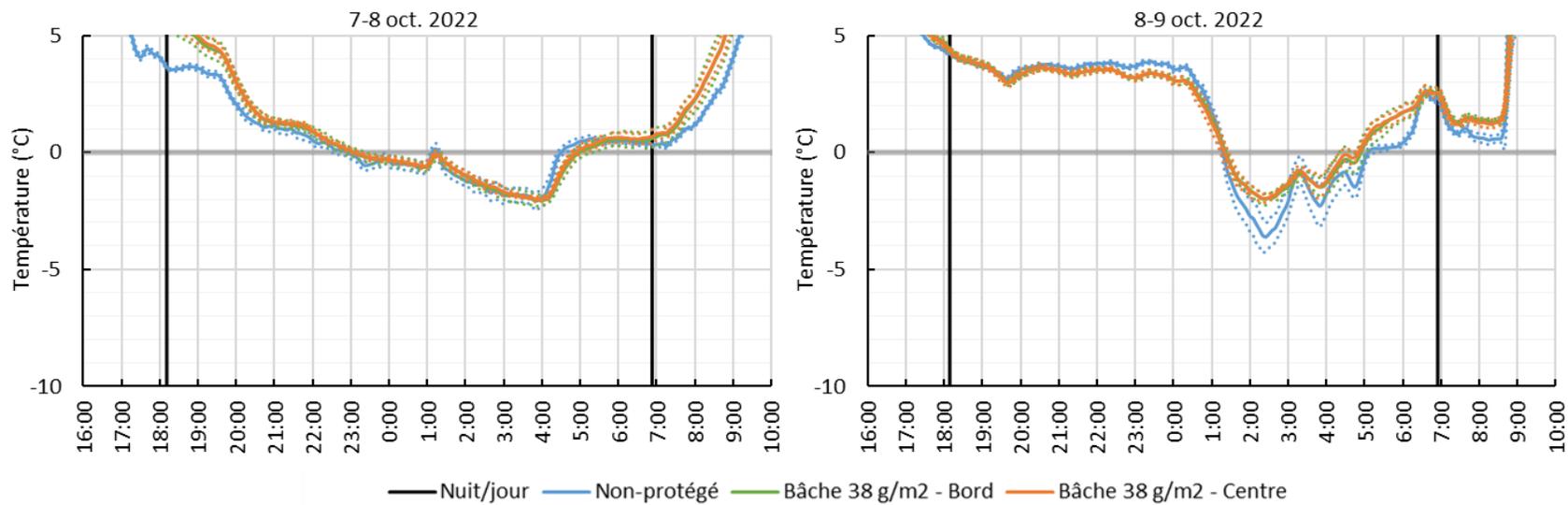


Figure 111. Au site « bâche 38 g/m² » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

Brise-vent

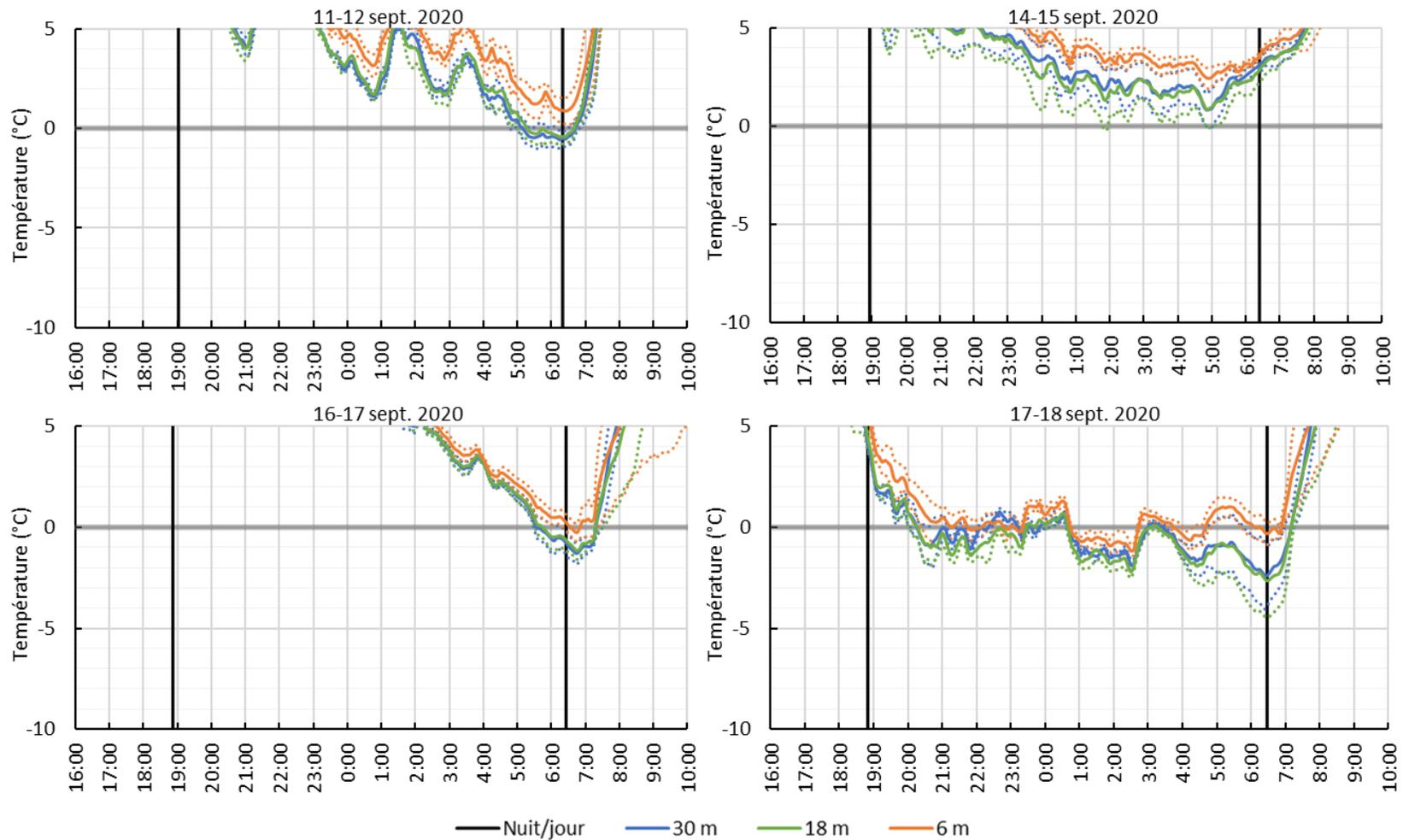


Figure 112. Au site « brise-vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

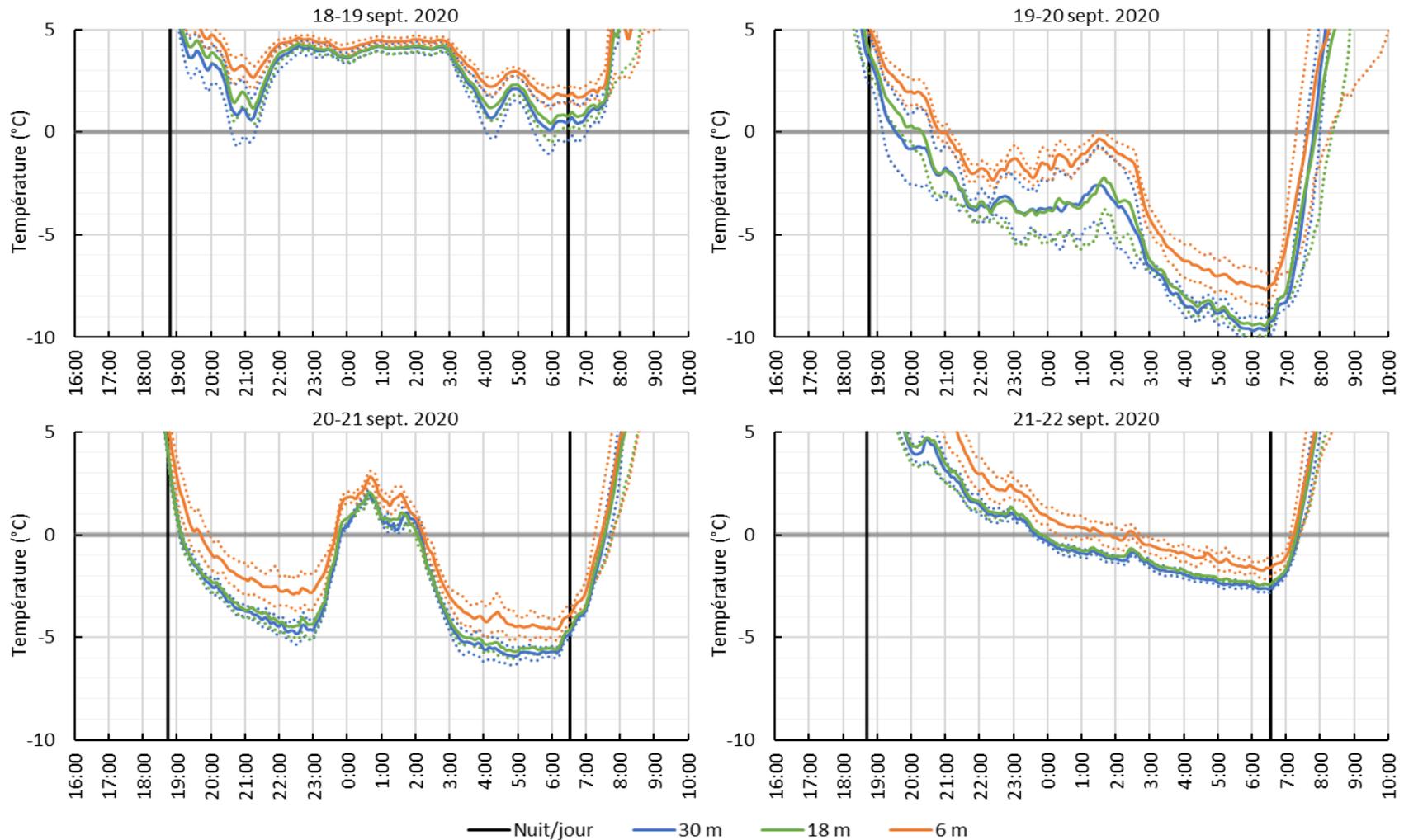


Figure 113. Au site « brise-vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

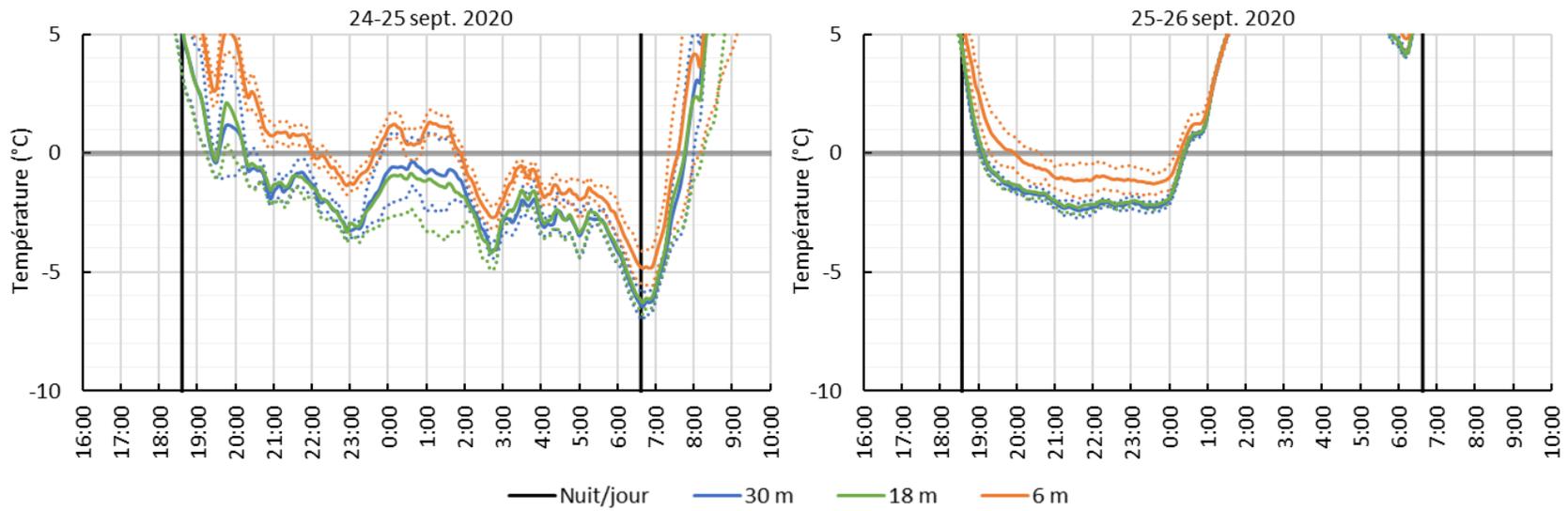


Figure 114. Au site « brise-vent » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

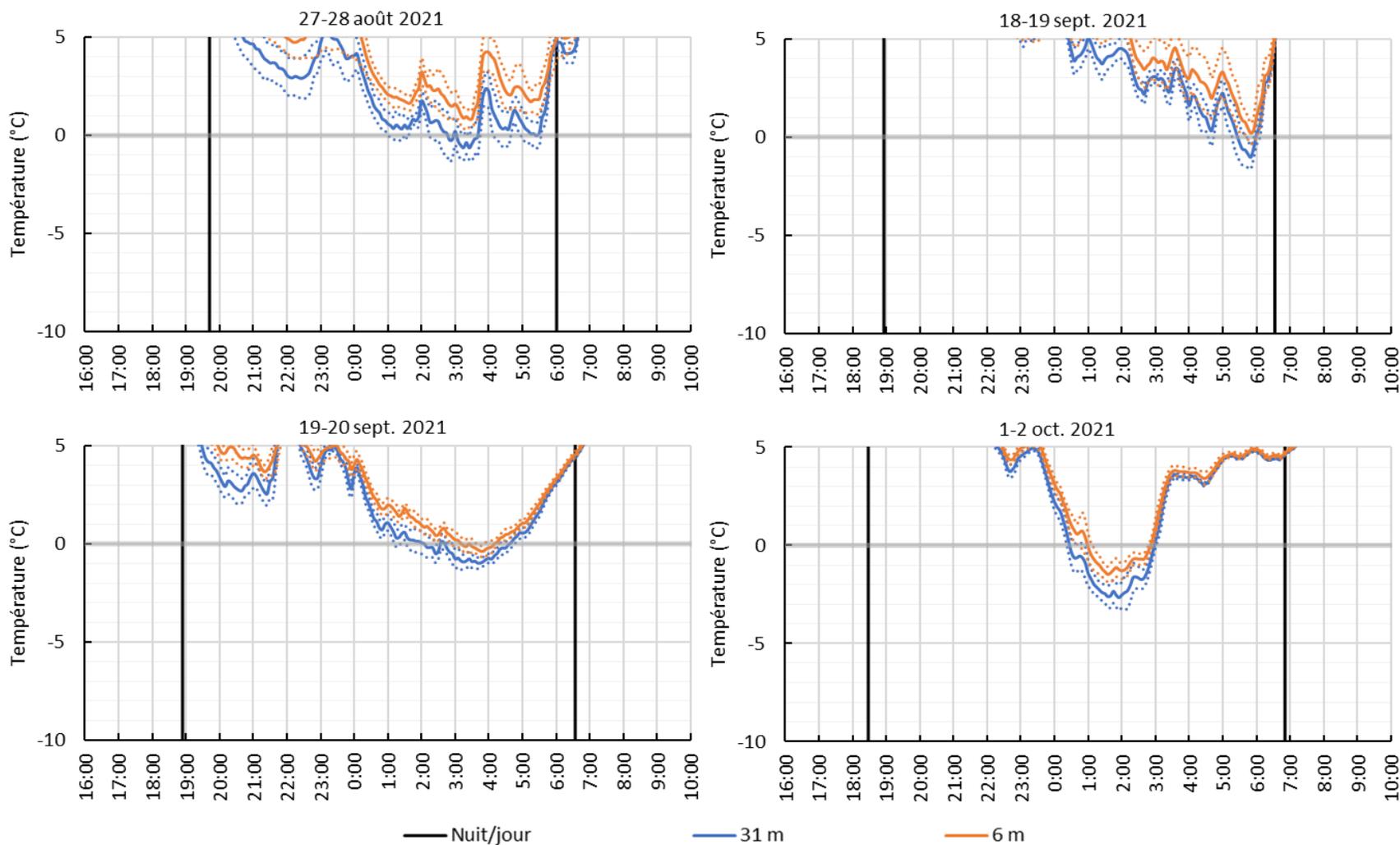


Figure 115. Au site « brise-vent » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

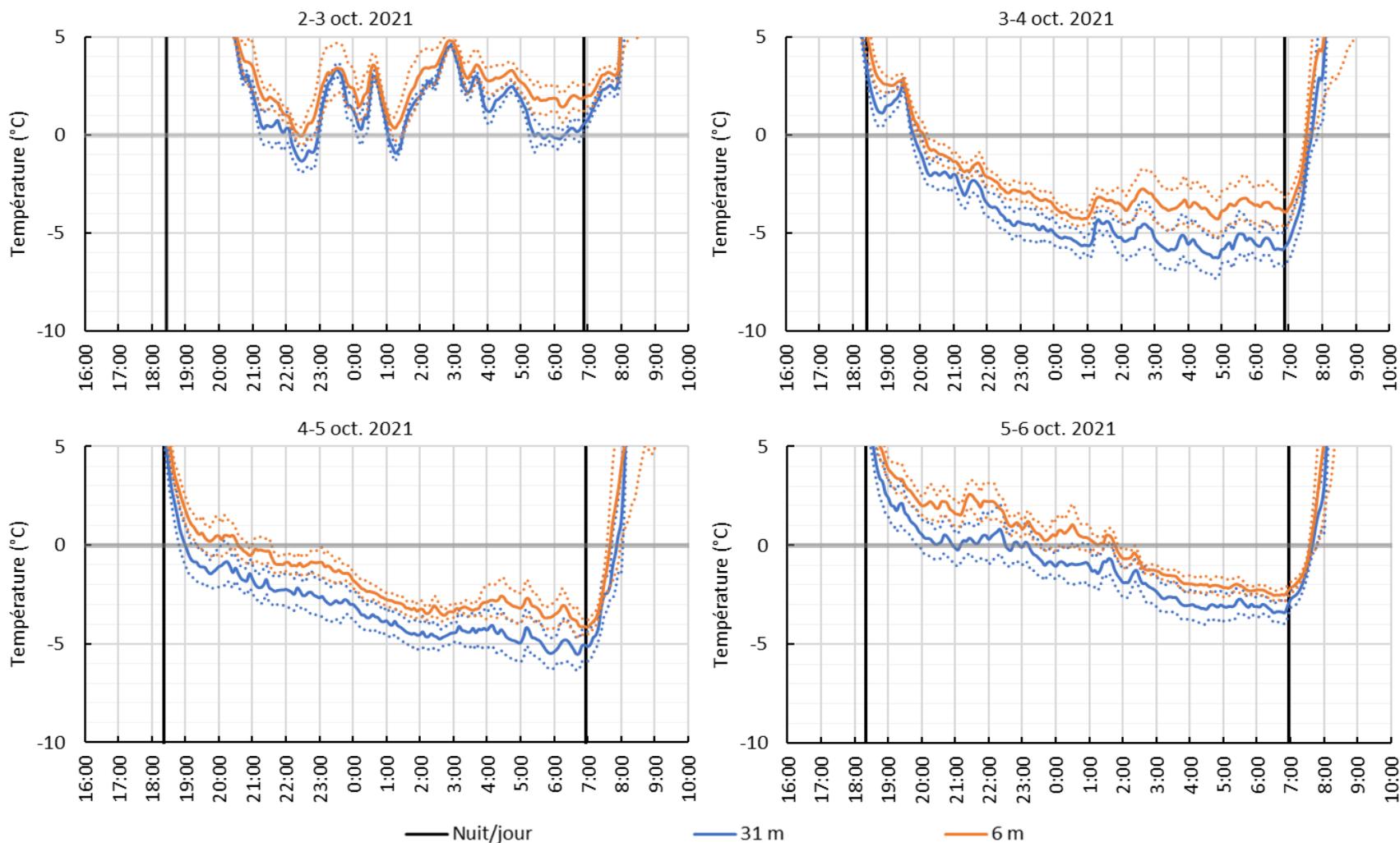


Figure 116. Au site « brise-vent » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

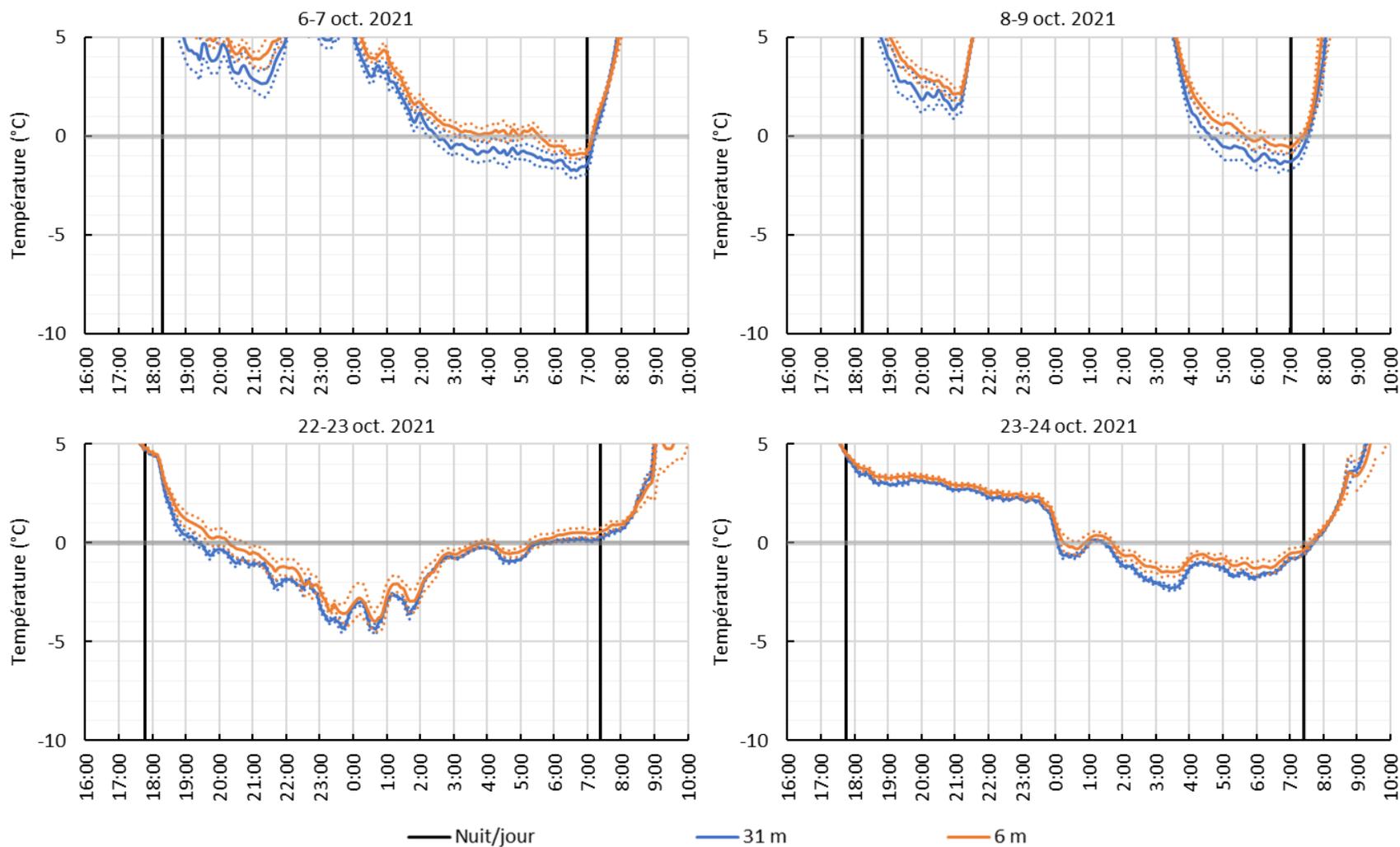


Figure 117. Au site « brise-vent » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent. Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

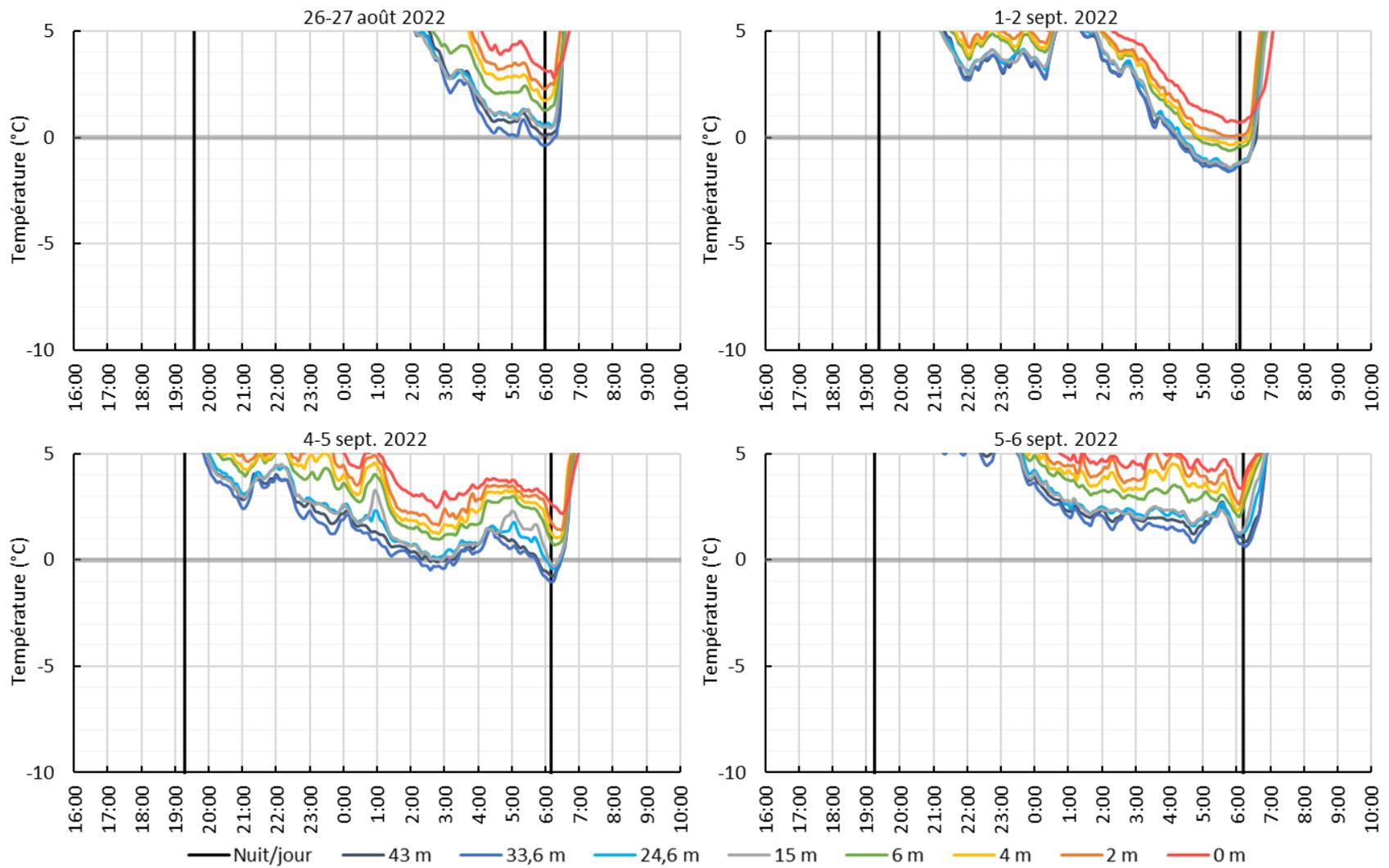


Figure 118. Au site « brise-vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent.

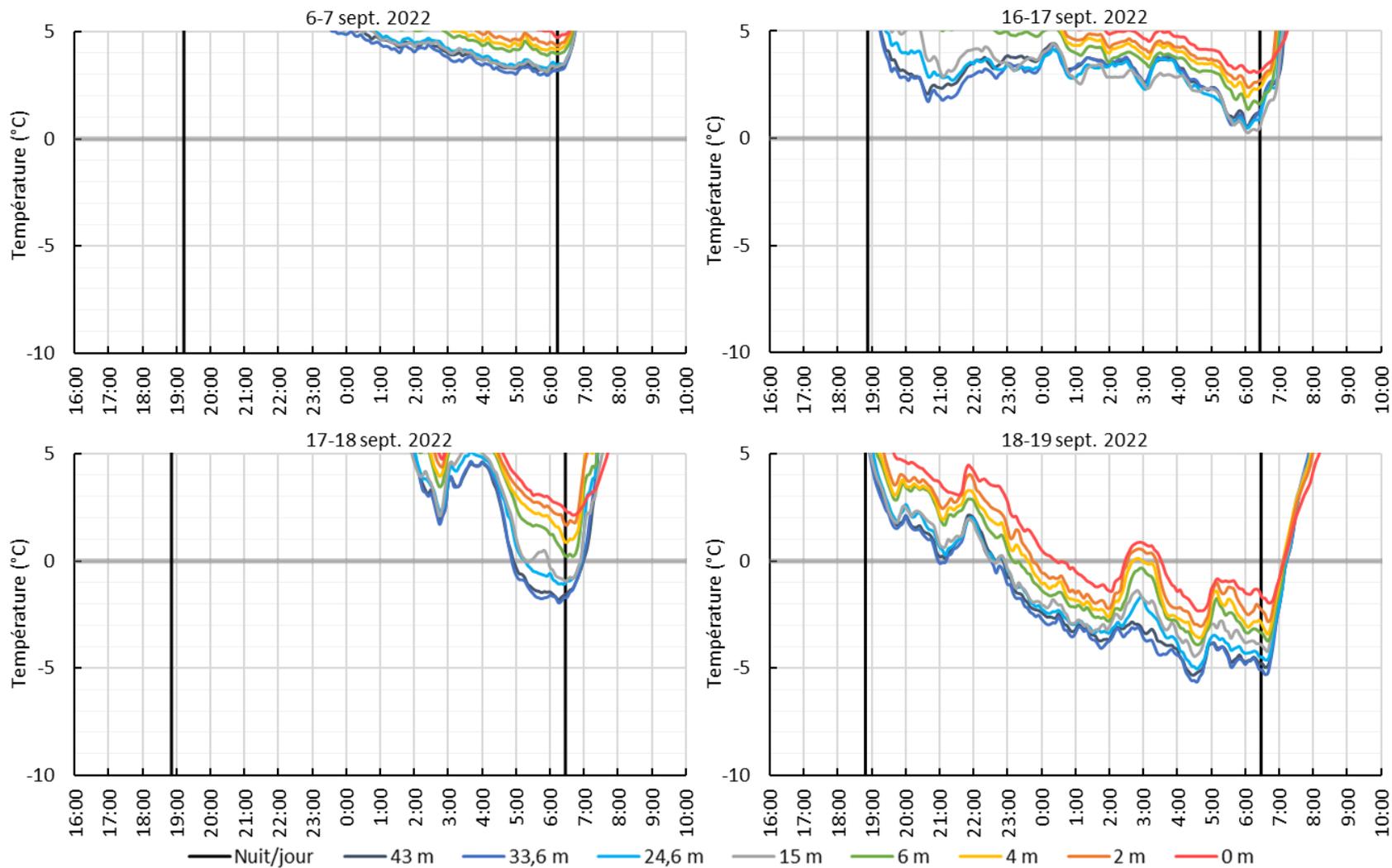


Figure 119. Au site « brise-vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent.

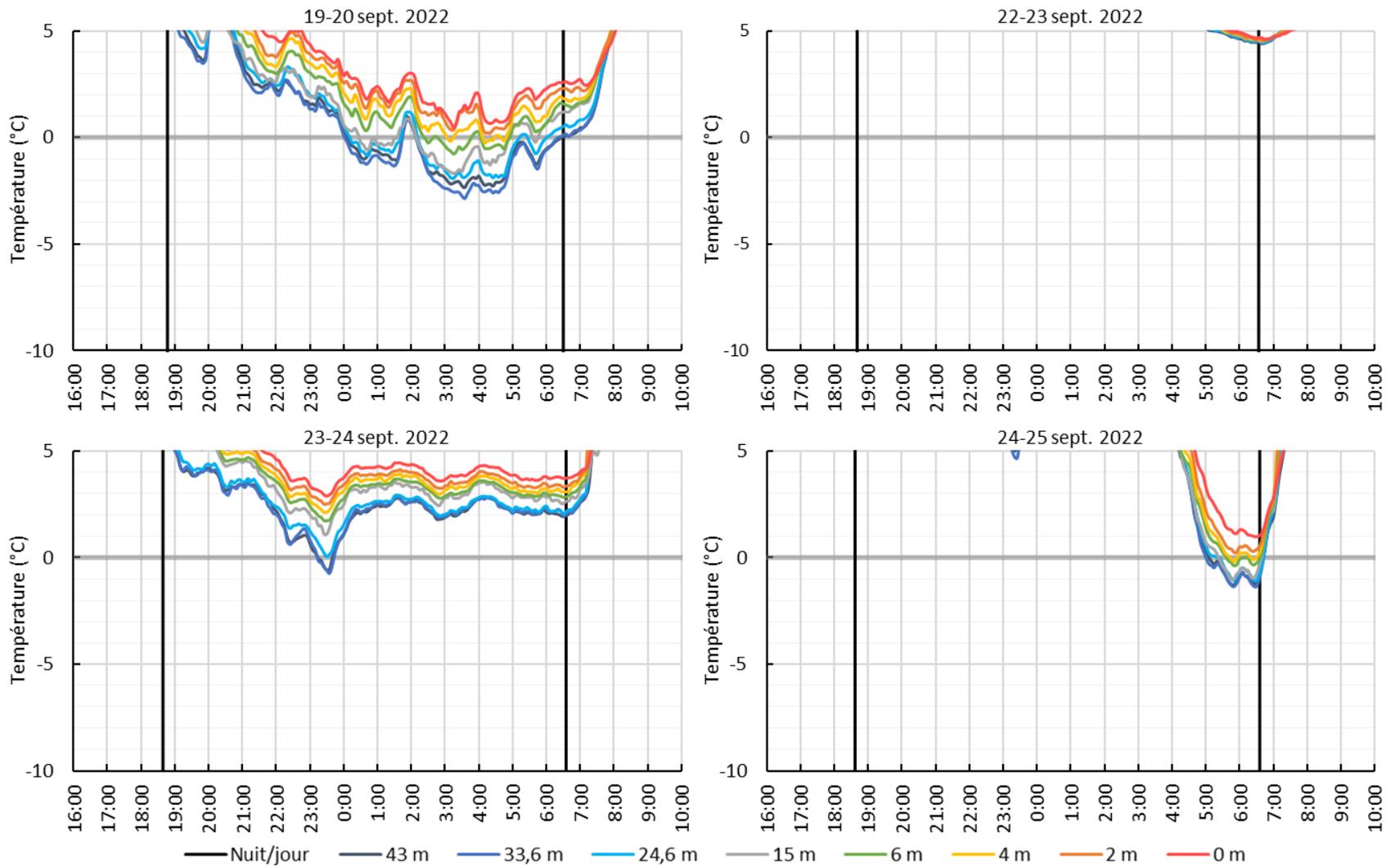


Figure 120. Au site « brise-vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent.

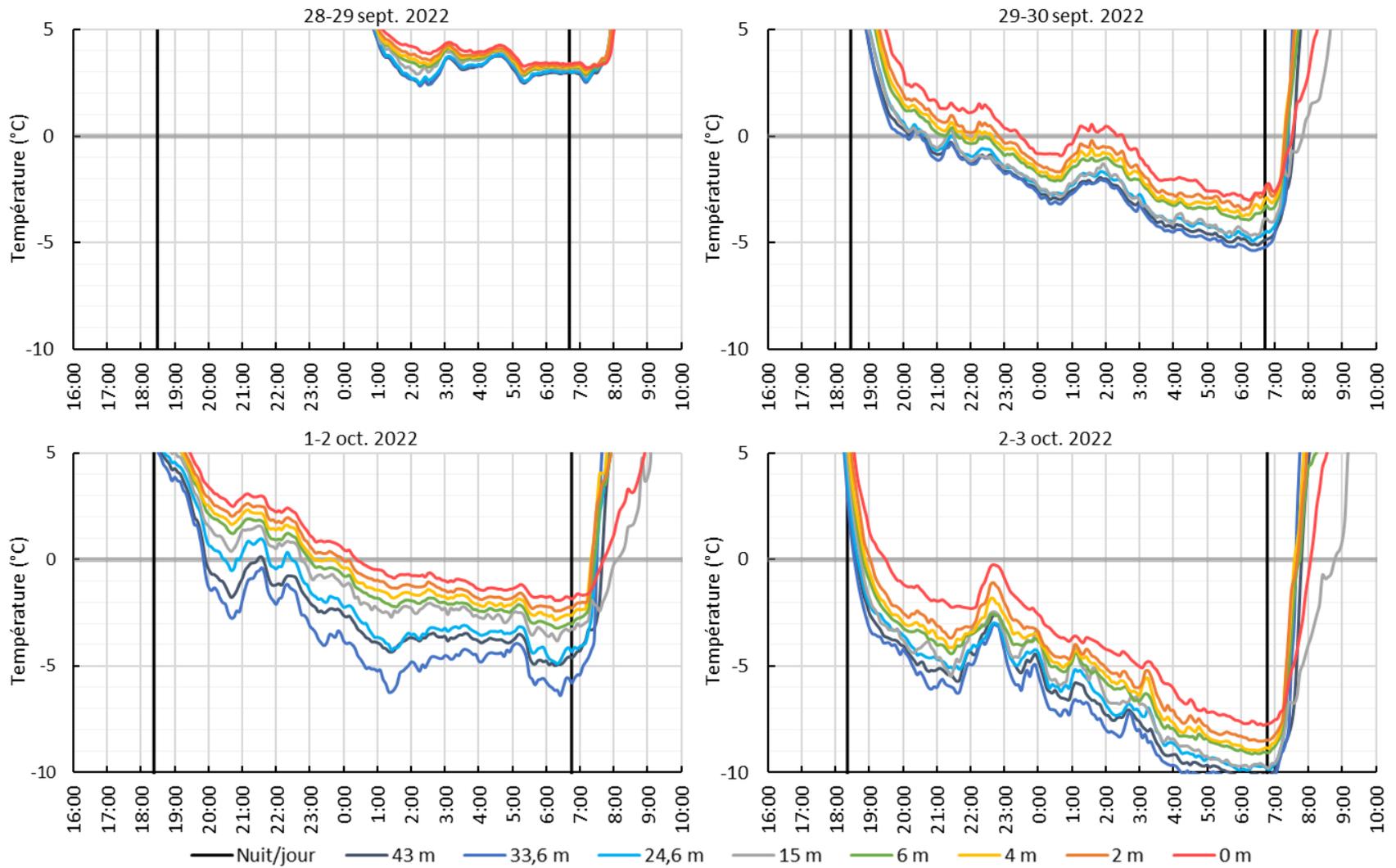


Figure 121. Au site « brise-vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent.

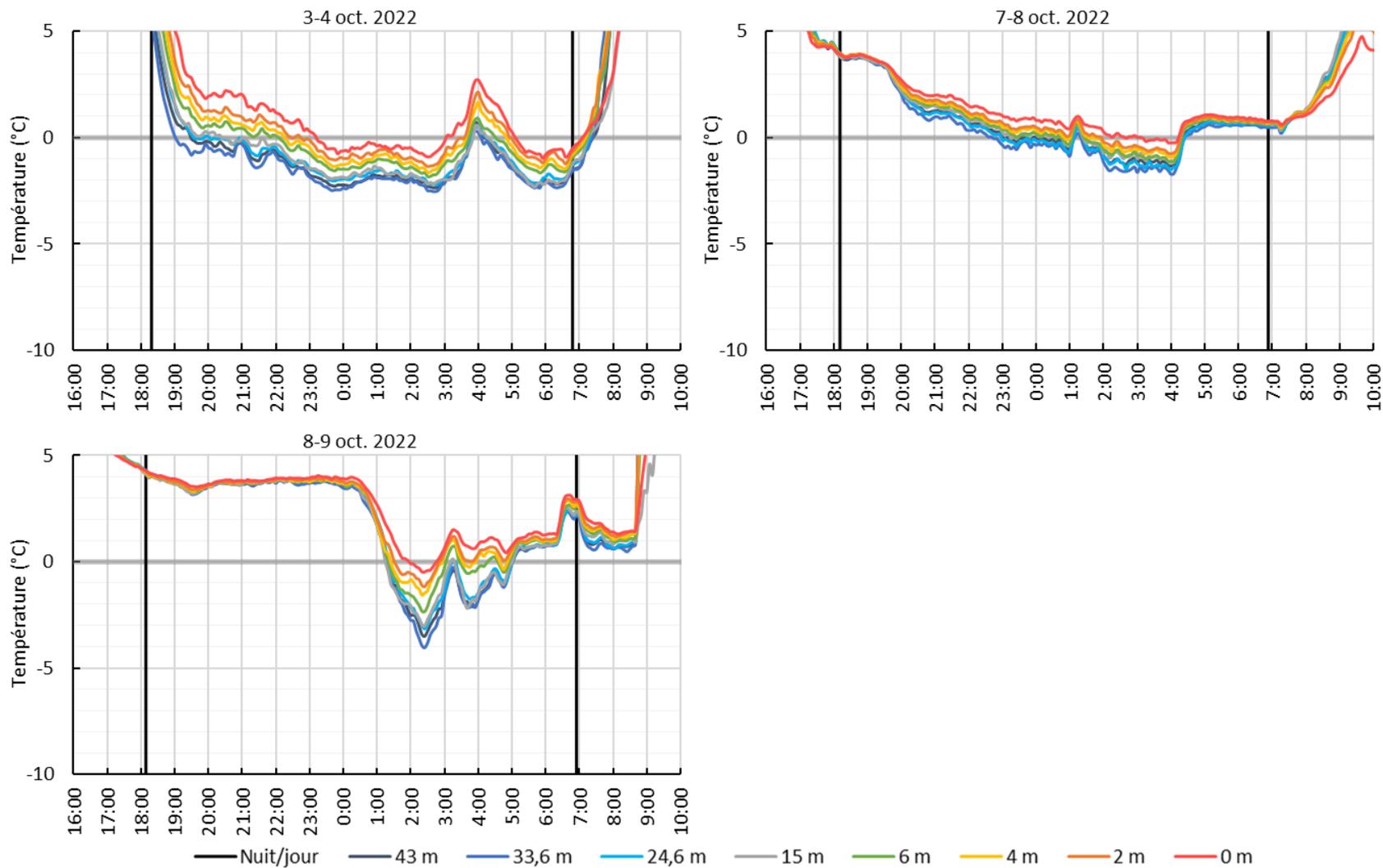


Figure 122. Au site « brise-vent » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C), selon leur distance par rapport au brise-vent.

Irrigation

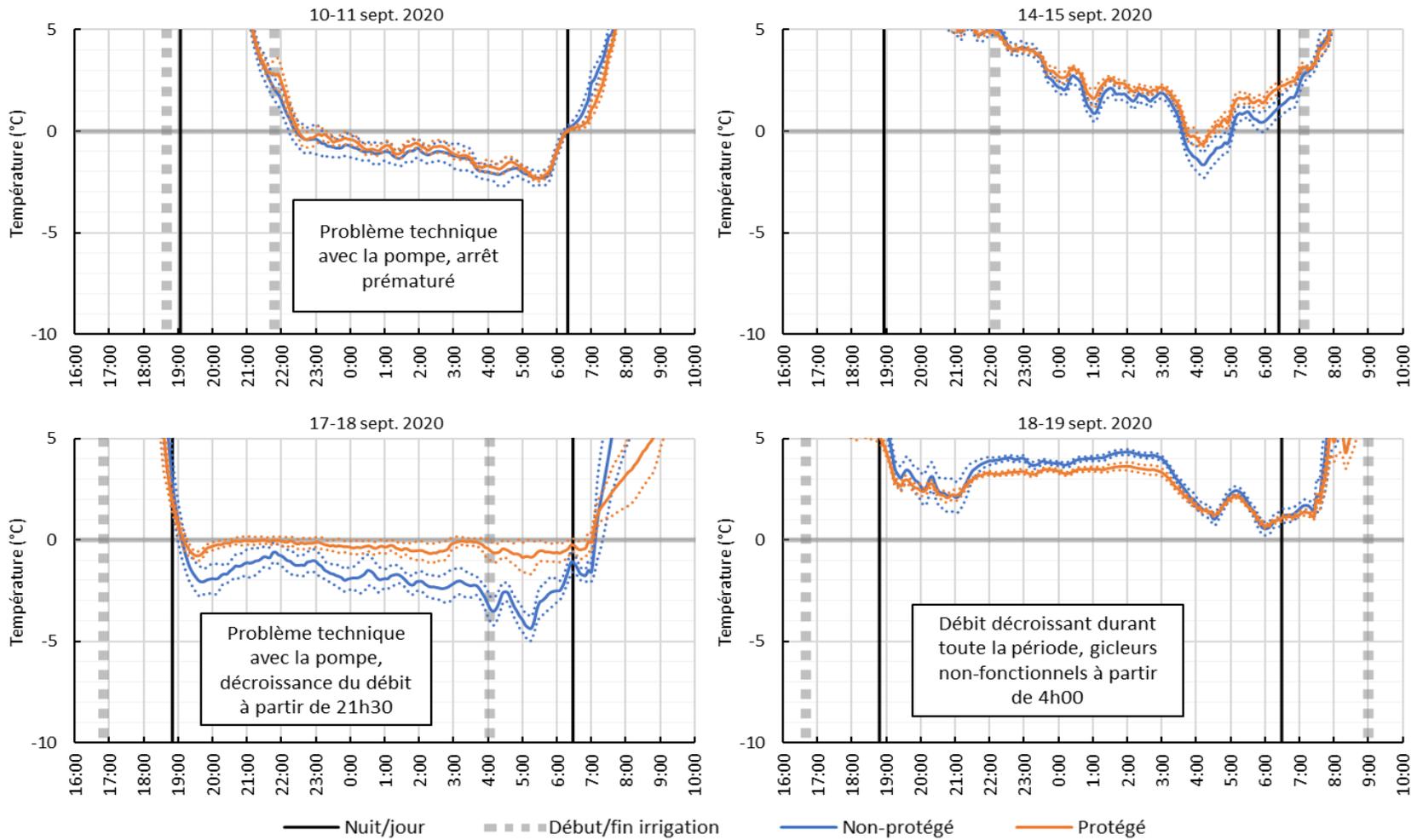


Figure 123. Au site « irrigation » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

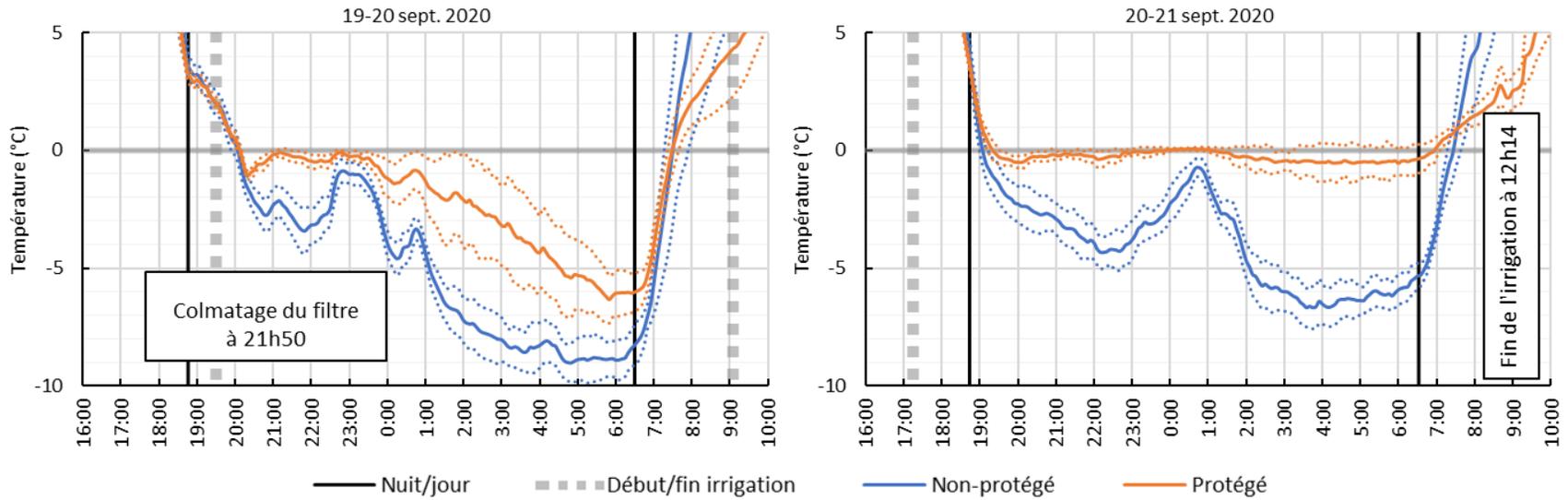


Figure 124. Au site « irrigation » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

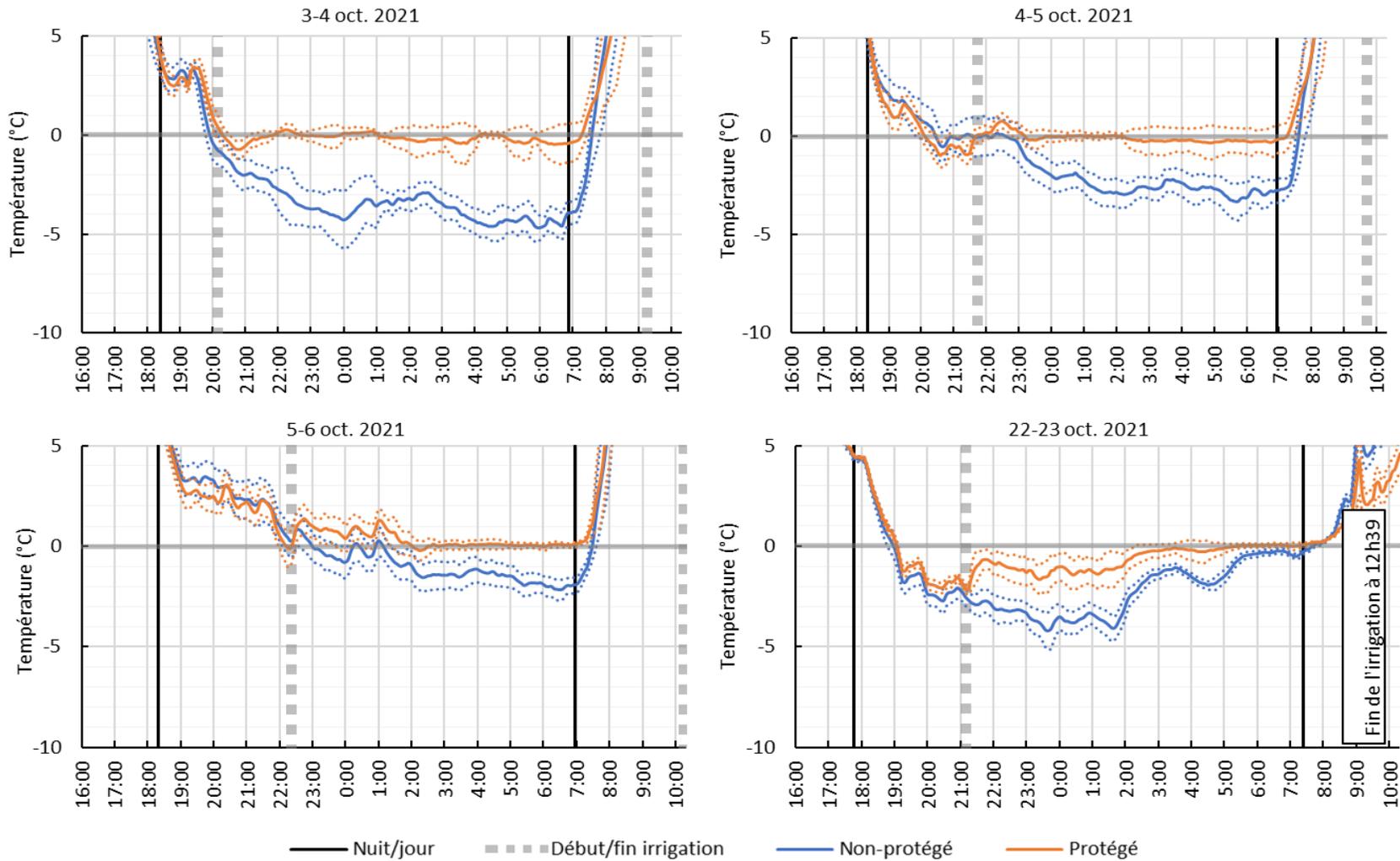


Figure 125. Au site « irrigation » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

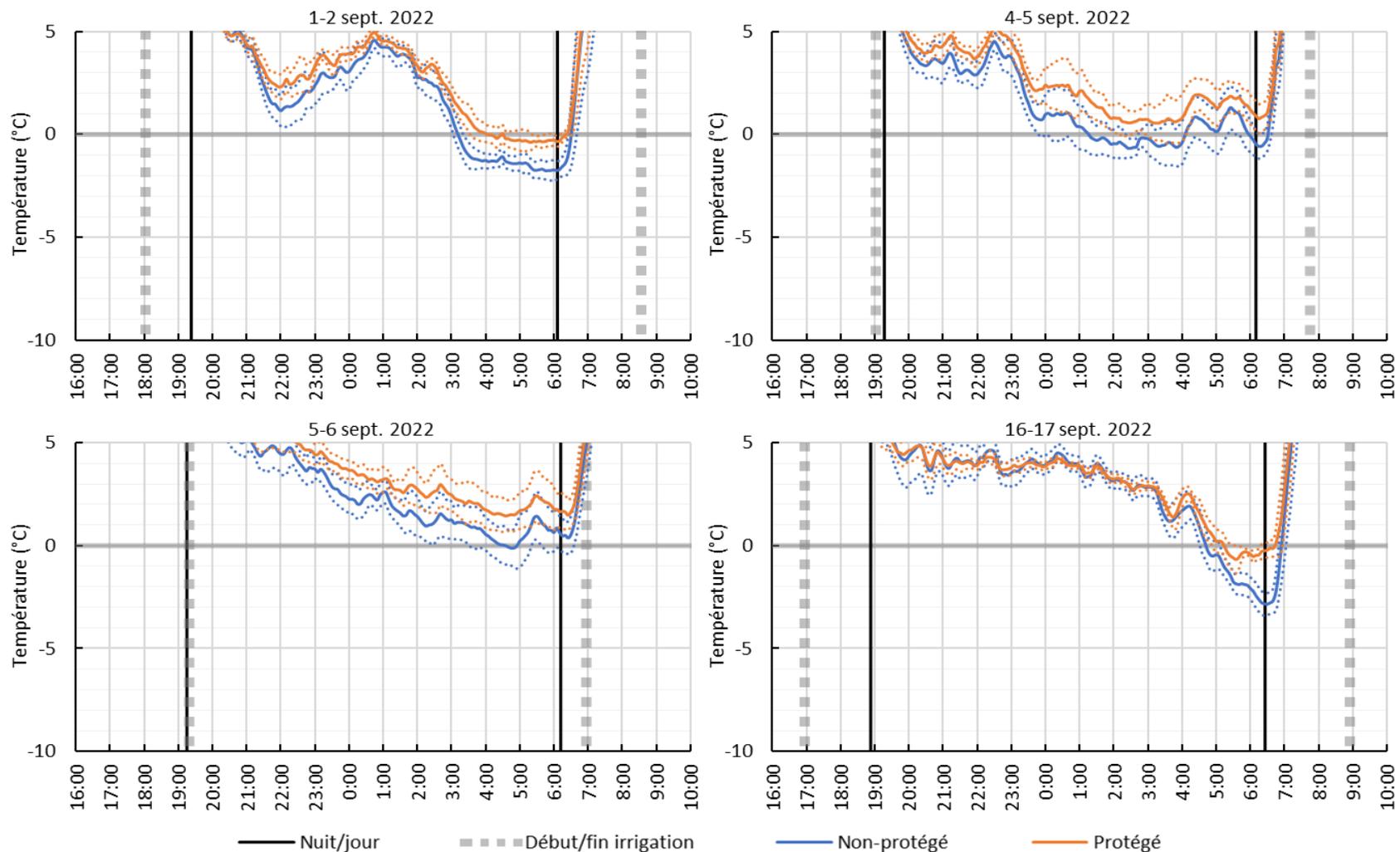


Figure 126. Au site « irrigation » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

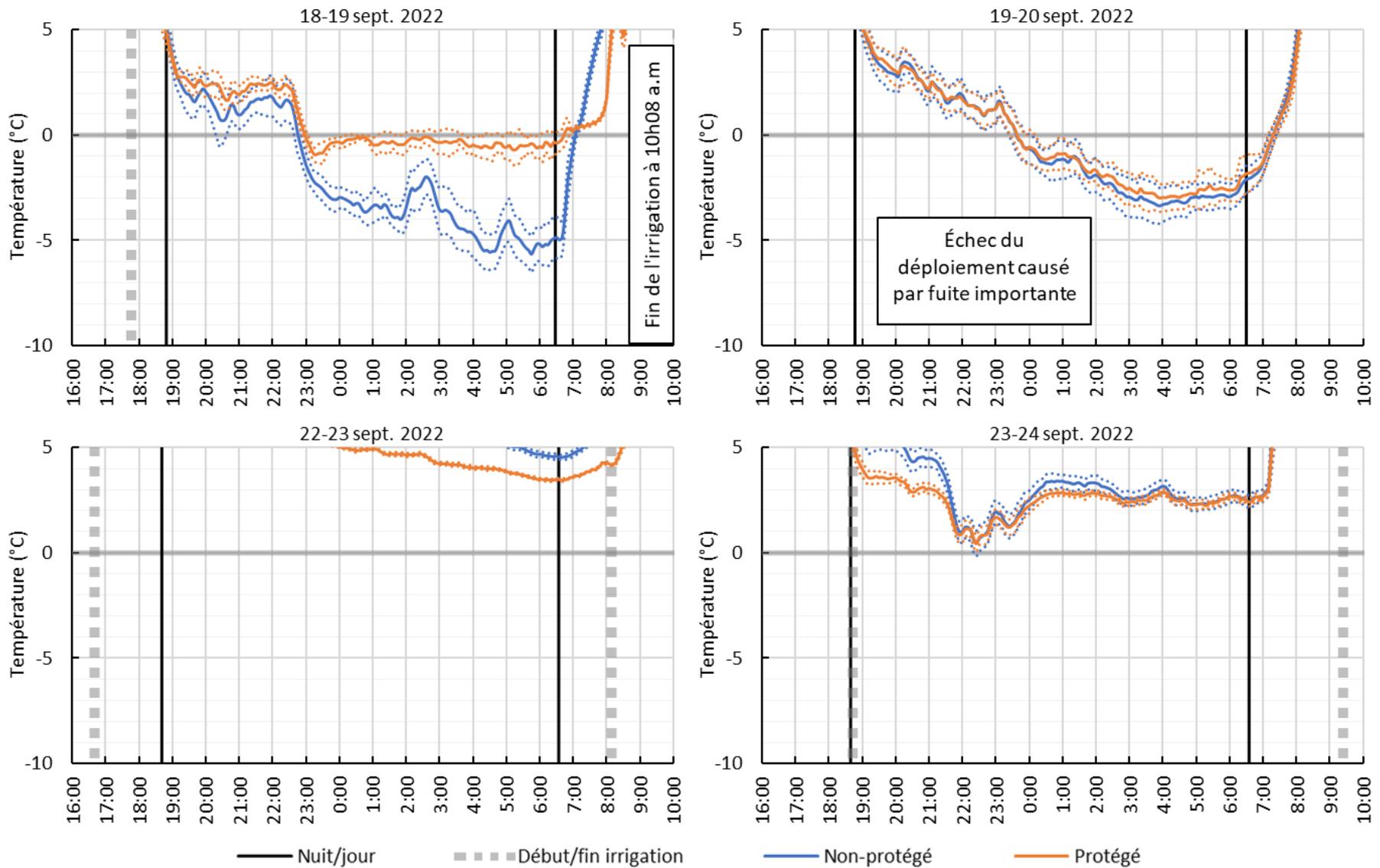


Figure 127. Au site « irrigation » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

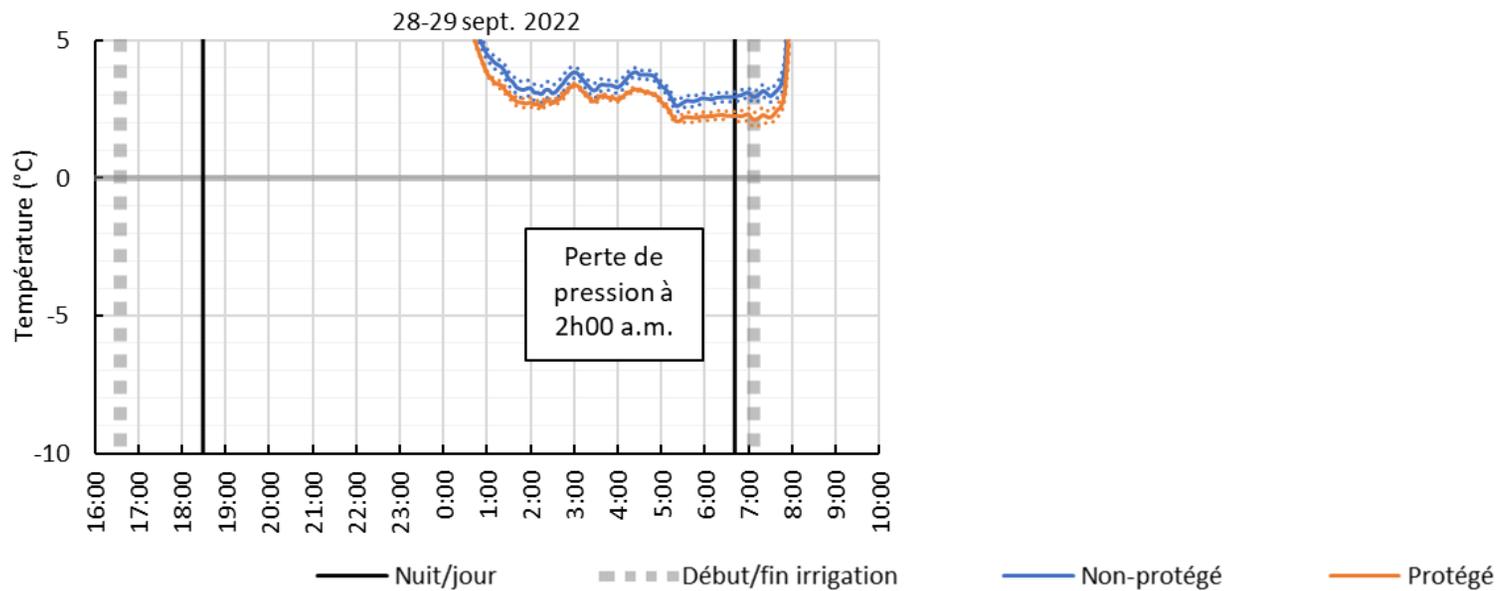


Figure 128. Au site « irrigation » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

Irrigation du sol sec

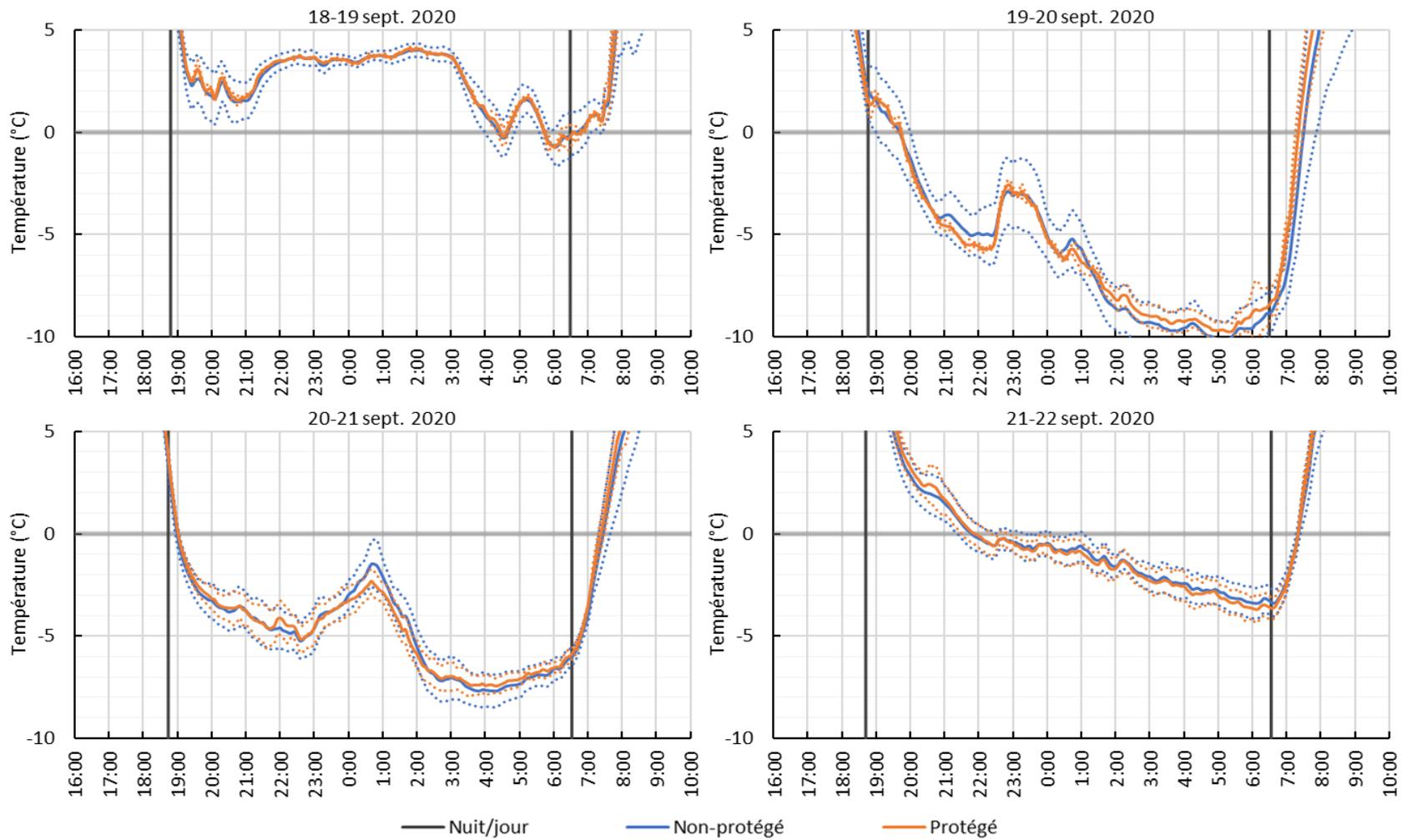


Figure 129. Au site « irrigation du sol sec » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

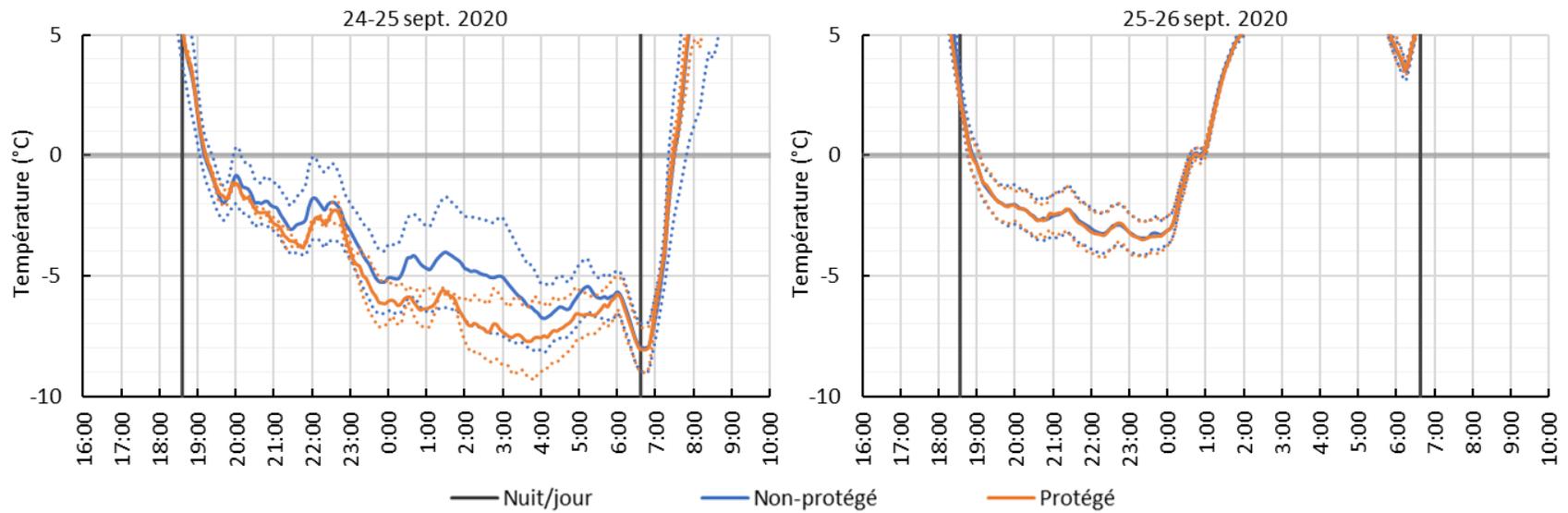
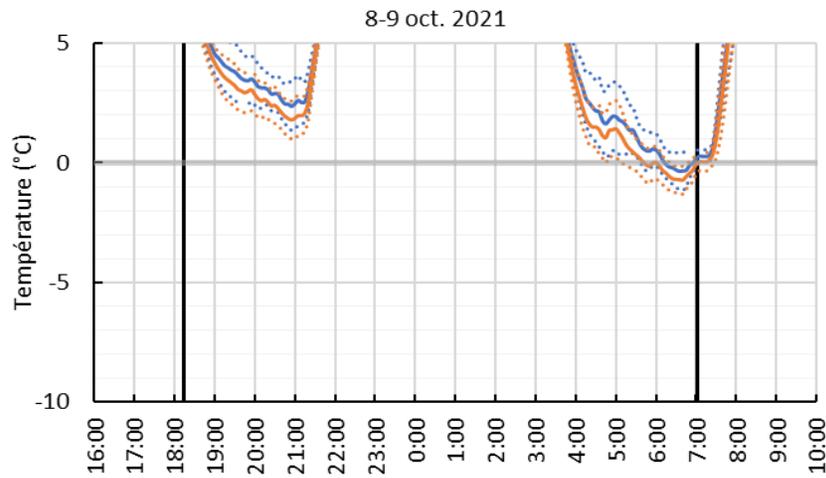
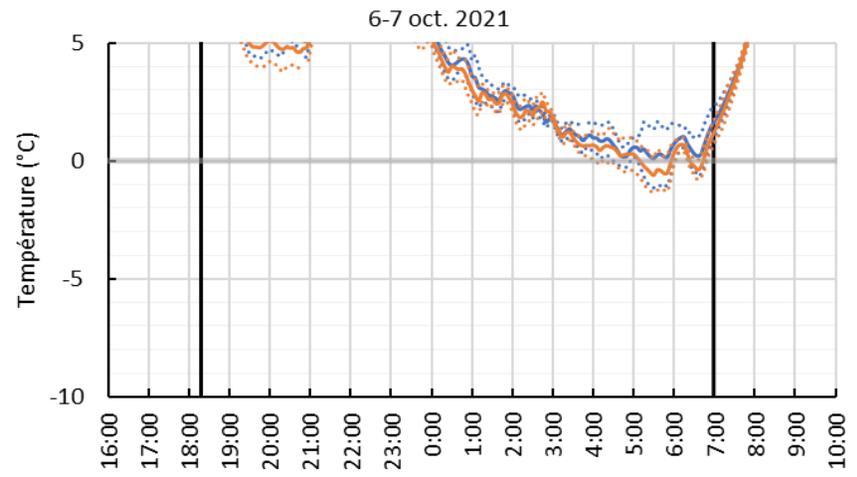
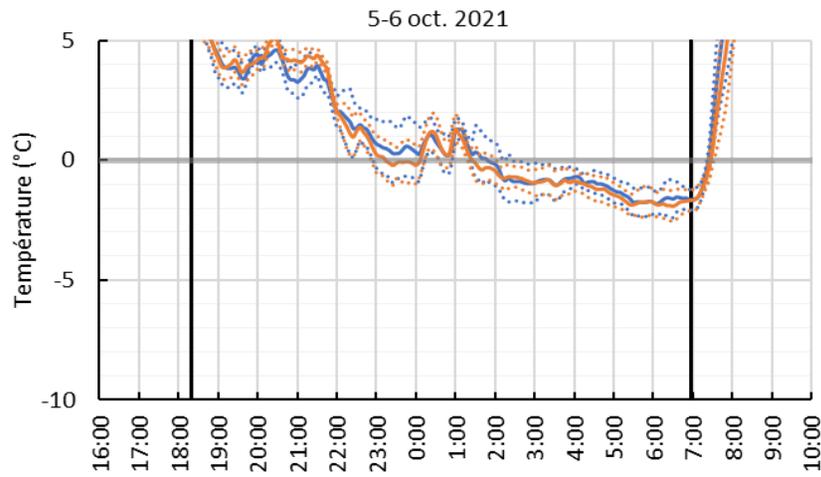


Figure 130. Au site « irrigation du sol sec » 2020, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.



— Nuit/jour — Non-protégé — Protégé

Figure 131. Au site « irrigation du sol sec » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

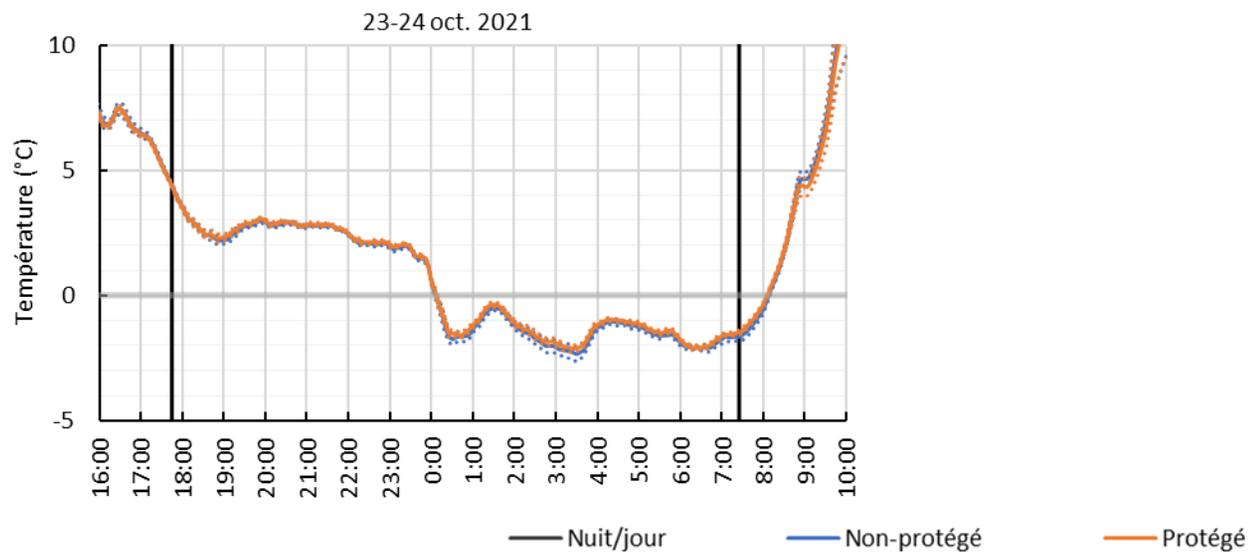


Figure 132. Au site « irrigation du sol sec » 2021, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

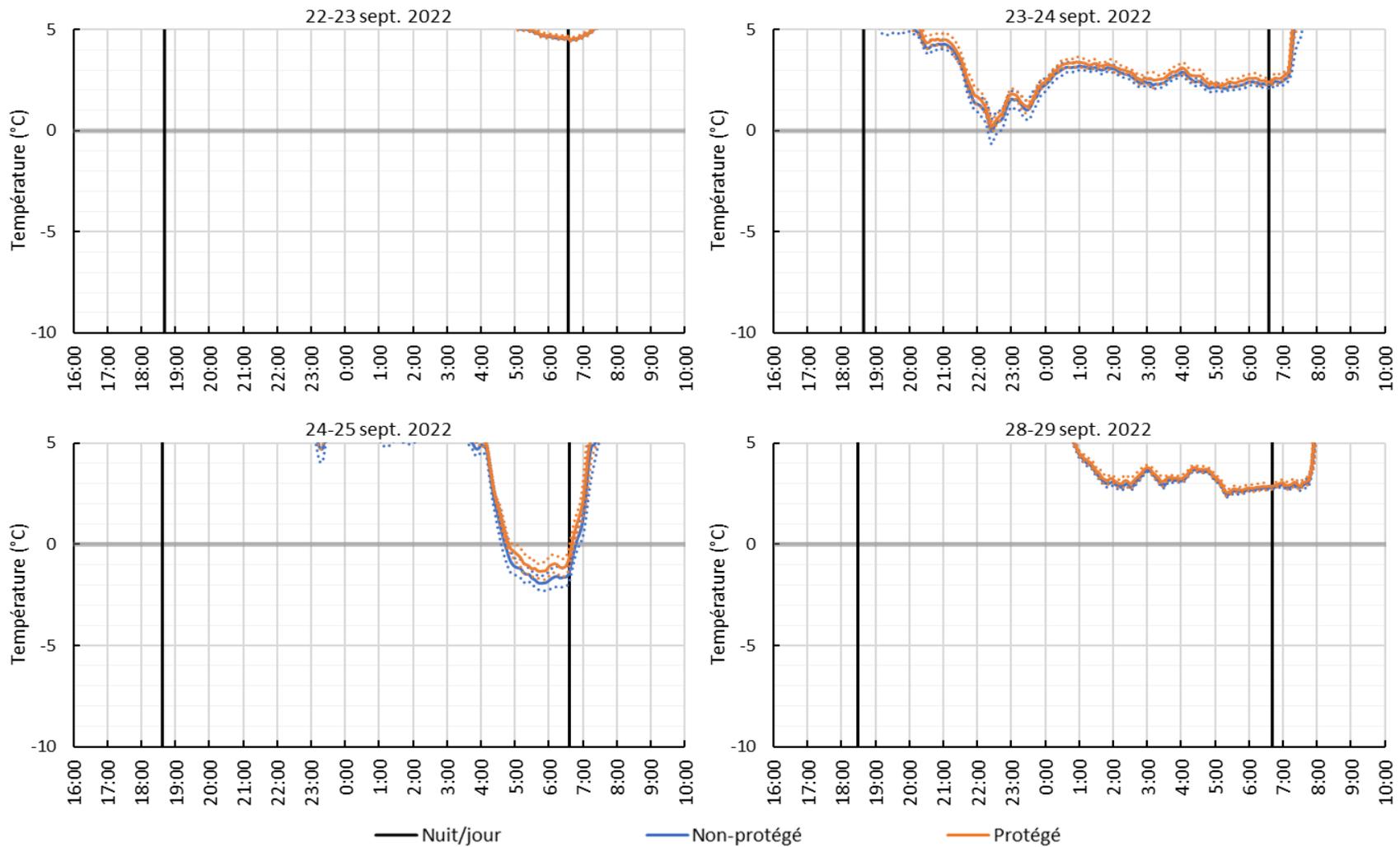


Figure 133. Au site « irrigation du sol sec » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

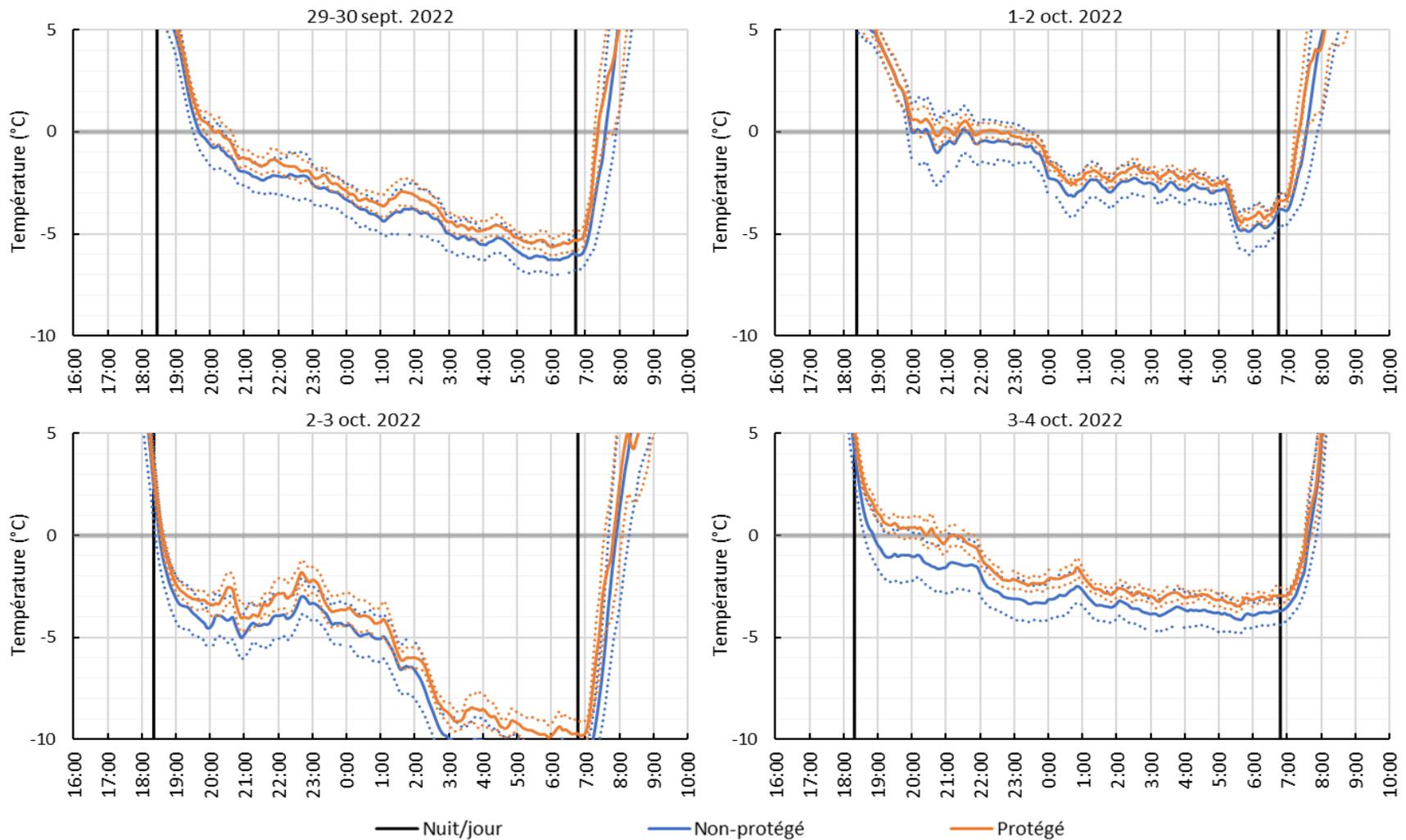


Figure 134. Au site « irrigation du sol sec » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

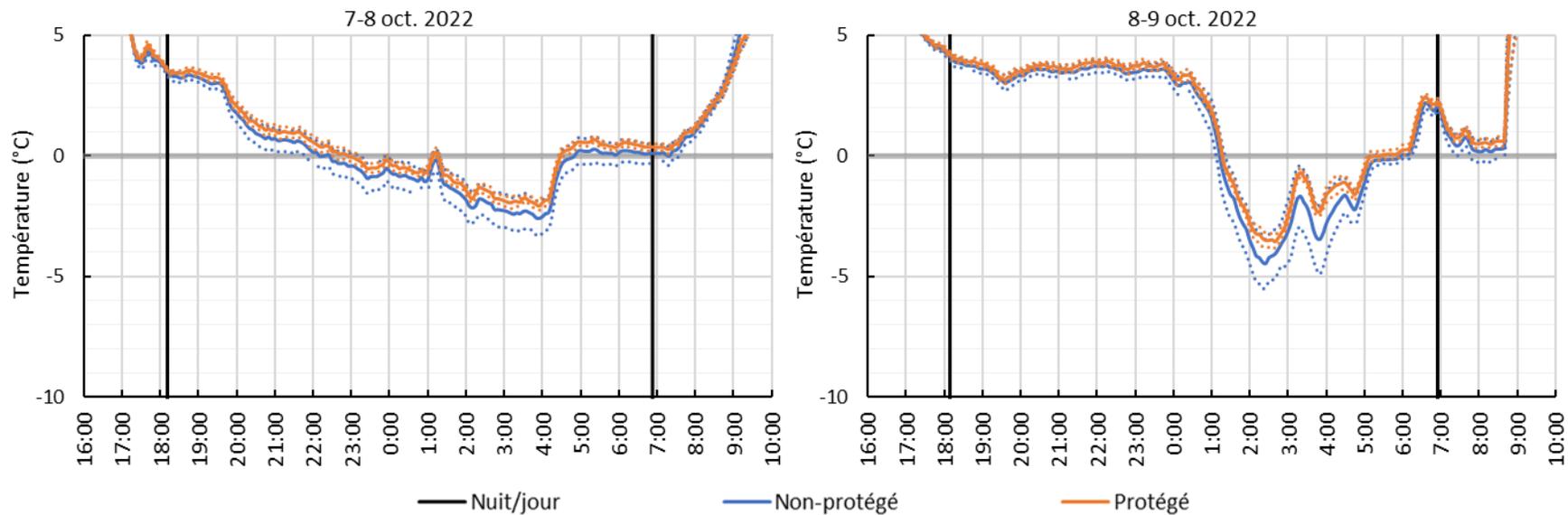


Figure 135. Au site « irrigation du sol sec » 2022, températures moyennes de l'air à la hauteur des fruits (°C). Les courbes pointillées représentent l'écart-type des moyennes.

Annexe 6. Visualisation de l'accumulation des degrés-heures gel sous DH_{-2°C}

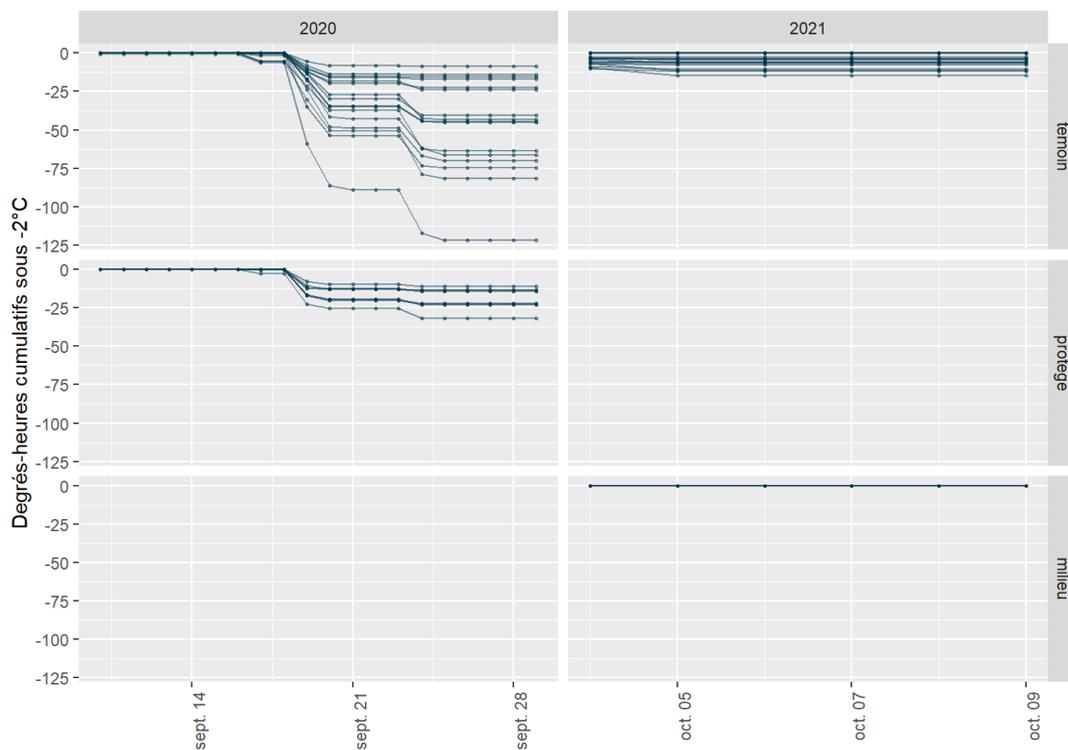


Figure 136. Aux sites « bâche 19 g/cm² », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.

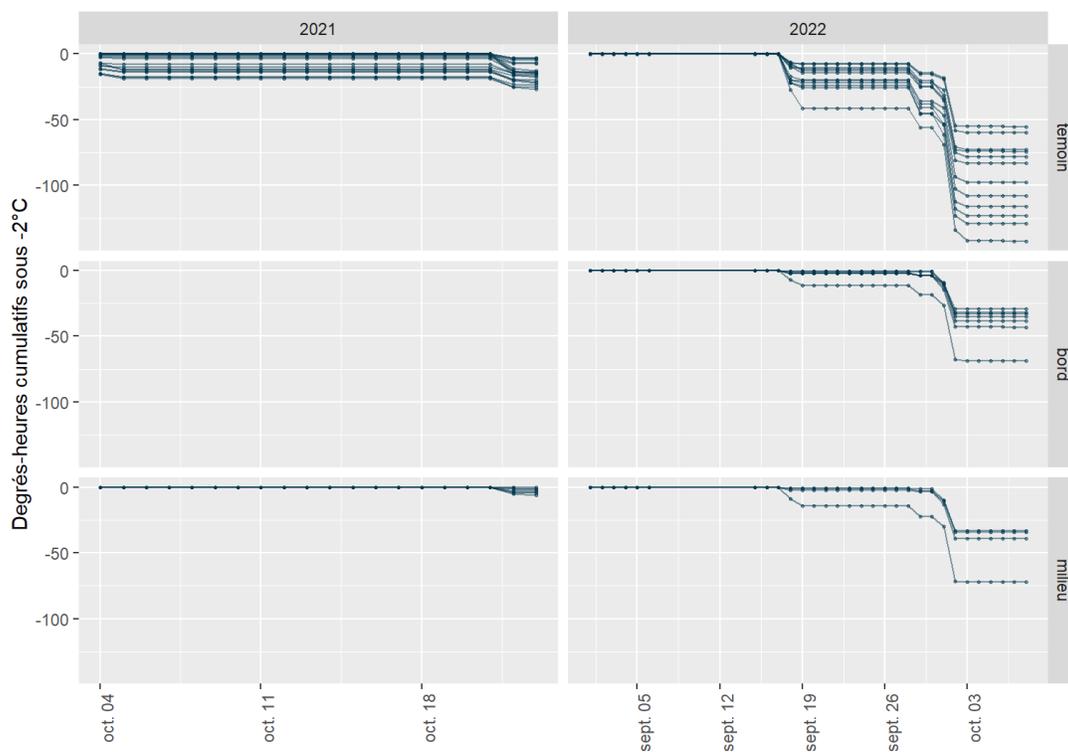


Figure 137. Aux sites « bâche 38 g/cm² », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.

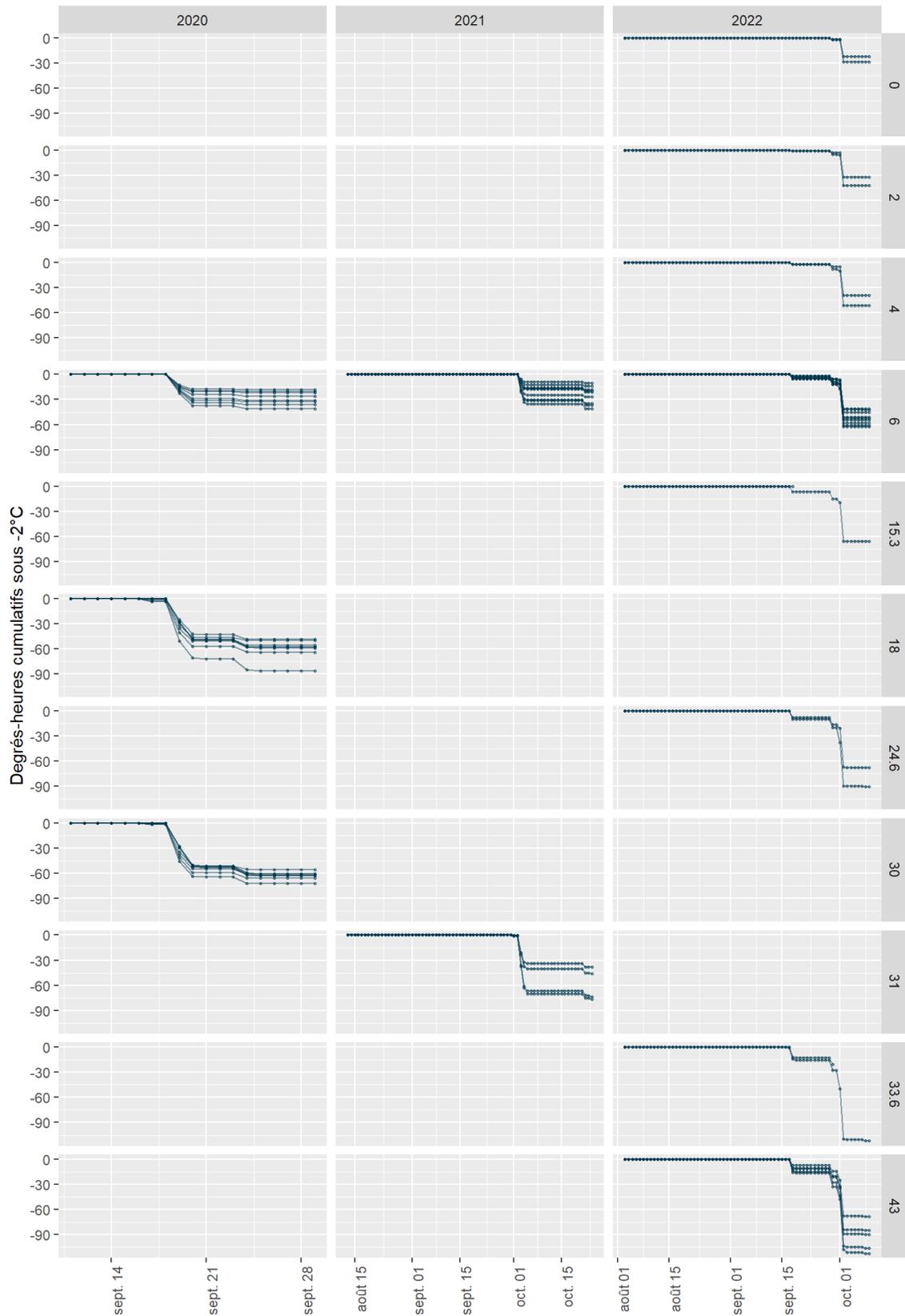


Figure 138. Aux sites « brise-vent », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.

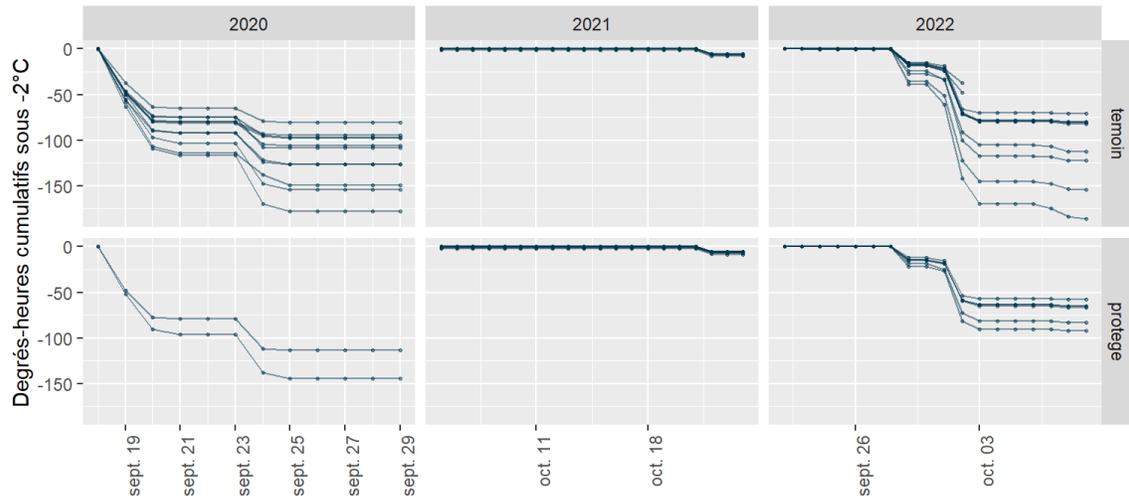


Figure 139. Aux sites « irrigation sol sec », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.

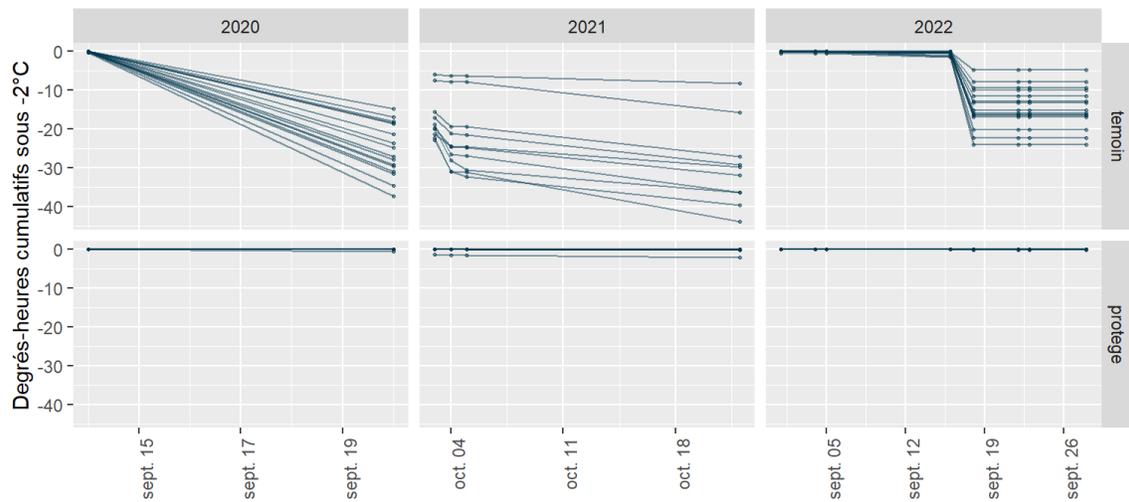


Figure 140. Aux sites « irrigation », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.

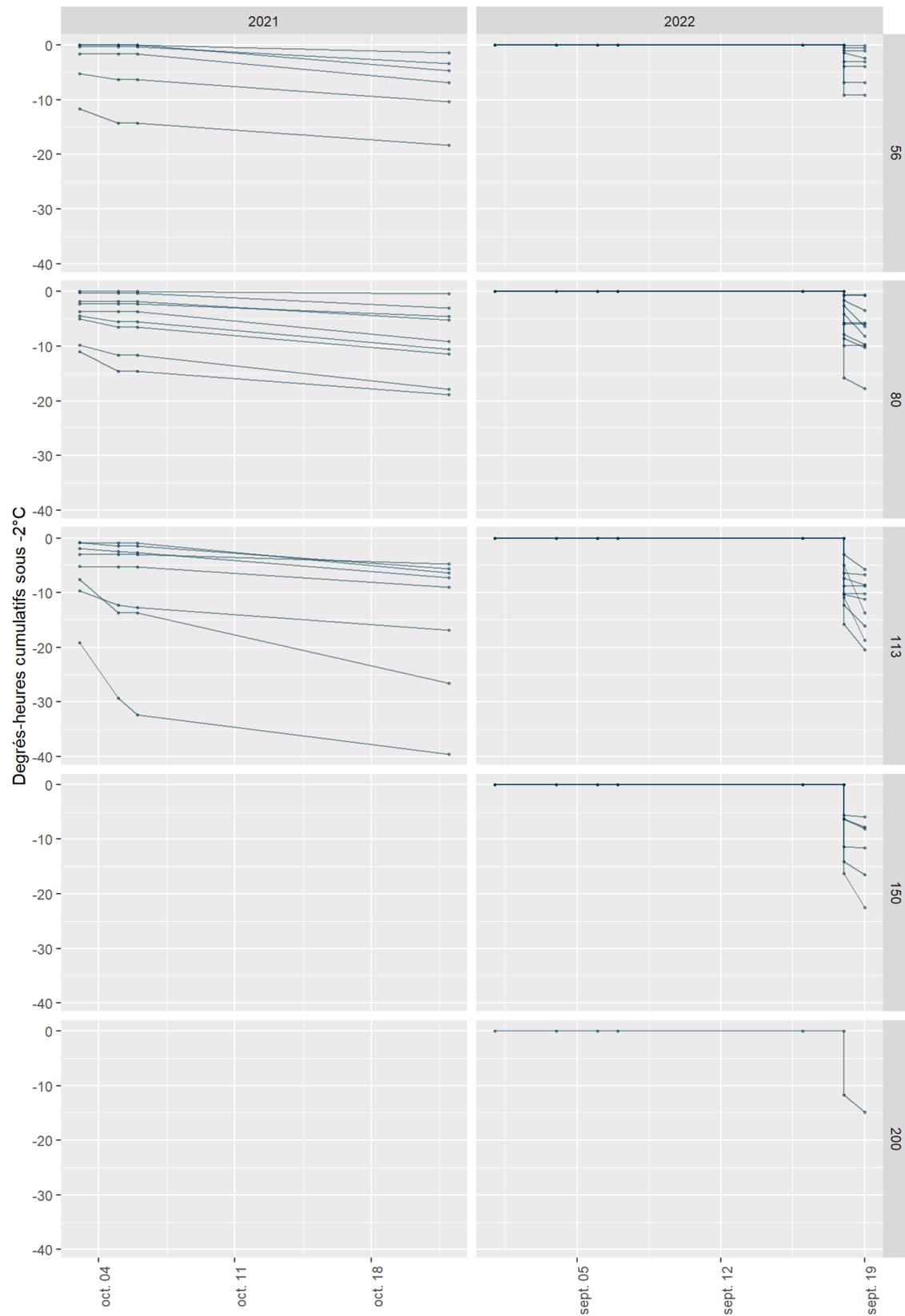


Figure 141. Aux sites « machine à vent », degrés-heures de gel cumulatifs sous -2 °C.

Annexe 7. Photos



Figure 142. Capteur MX2201 (Onset) installé à la hauteur des fruits pour le suivi de la température de l'air, 22 juillet 2021.



Figure 143. Machine à vent déployée dans une trouée de brise-vent, saison 2021.



Figure 144. Vue détaillée de la machine à vent Tow and Blow 250 h 1) carénage, 2) moteur, 3) ventilateur, 4) bras hydraulique, 5) panneau de contrôle, 6) attache remorque pour le transport (image tirée du feuillet technique du fabricant Tow and Blow, 2022).



Figure 145. Tour du suivi de la stratification thermique de l'air au site machine à vent, mai 2022.

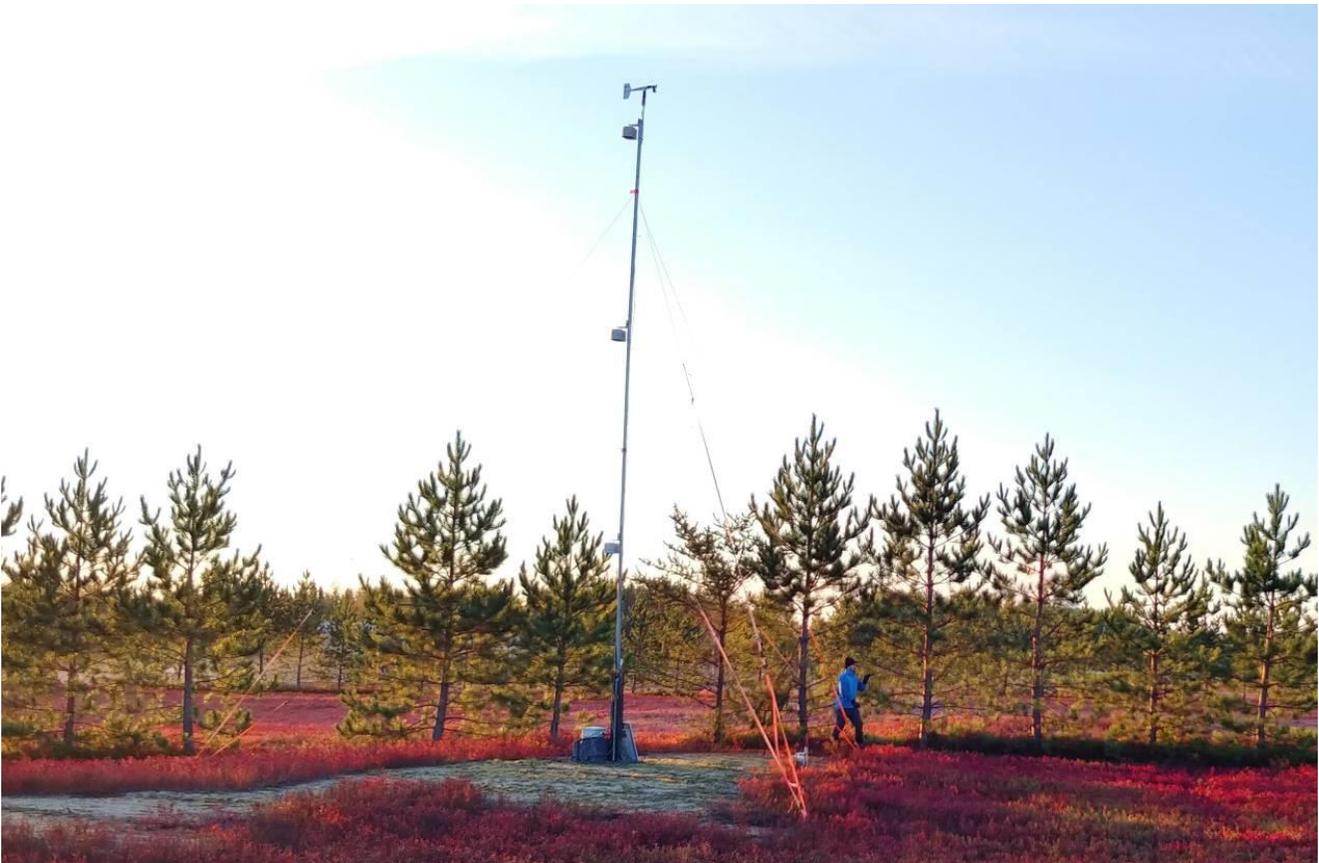


Figure 146. Tour du suivi de la stratification thermique de l'air au site « machine à vent », octobre 2021.



Figure 147. Remplissage du réservoir de diesel de la machine à vent en position abaissée.

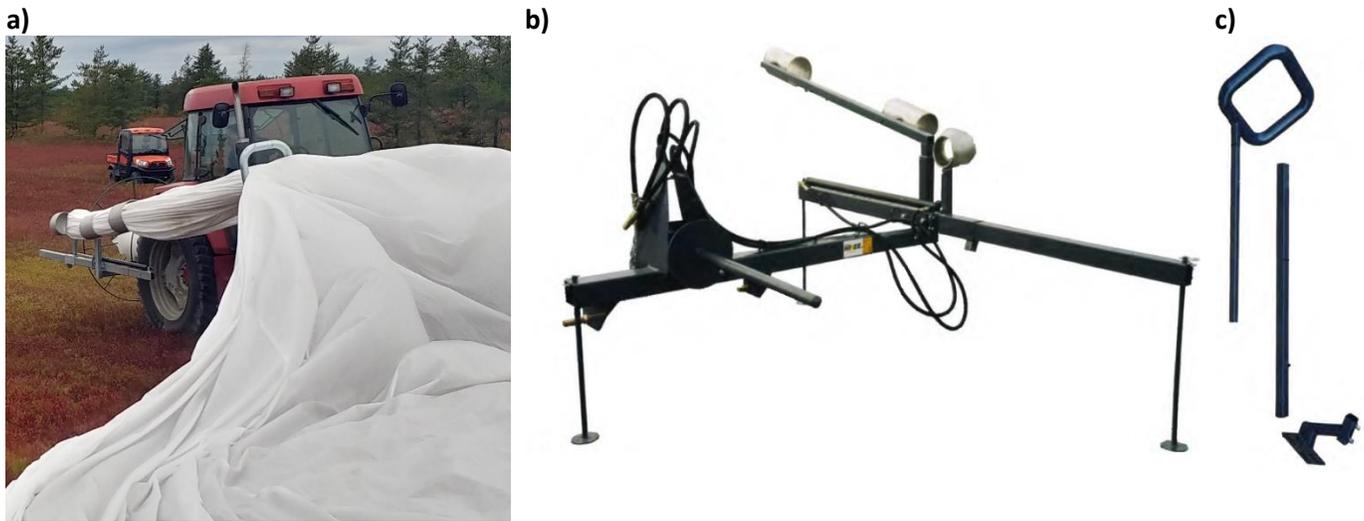


Figure 148. Vue en pièces de la dérouleuse/enrouleuse spécialisée du System Hiwer a) vue montée sur tracteur, b) vue d'ensemble de l'assemblage arrière, c) vue des pièces de l'assemblage du collecteur avant (images adaptées du feuillet technique du fabricant Hiwer, Suède).



Figure 149. Installation d'une bâche, 2021.



Figure 150. Enroulement avec système Hiwer d'une bâche pour le remisage à la suite d'une période de protection contre le gel, 25 octobre 2021.



Figure 151. Effet visible du réchauffement à proximité d'un brise-vent, épisode de gel 2021.



Figure 152. Vue aérienne des brise-vent de la bleuetière, 20 septembre 2022.



Figure 153. Irrigation contre le gel encore en fonction à l'aube (7 h 30), épisode de gel du 4 au 5 octobre 2021.



Figure 154. Glace formée sur les plants à la suite d’une irrigation contre le gel, 5 octobre 2021.



Figure 155. Qualité du bleuet (d'allure vendable) n'étant pas encore affecté par les épisodes de chaleur de la mi-août à la fin-août, 12 août 2021.



Figure 156. Journée de « démonstration à la ferme », 20 septembre 2022.



Aide-mémoire: culture du bleuet

Résumé de la journée du 20 septembre 2022 à Normandin

Méthodes de protection contre le gel

1. Bâche : gain maximal de 2 °C mesuré.
2. Machine à vent : gain maximal de 3 °C mesuré (portée de 1 à 2 ha). Inefficace en conditions venteuses.
3. Irrigation : protection mesurée jusqu'à - 6 °C.

Irrigation, travail du sol et fertilisation

- L'irrigation en végétation (2021) et en production (2022) a permis d'augmenter les rendements de 40 %.
- Travail du sol et fertilisation : Il faudra patienter jusqu'au rapport final (Hiver 2023).

Projets précédents

Ces projets s'inscrivent dans la suite logique de résultats obtenus depuis 2015:

- [Régie raisonnée de l'eau](#) ;
- [Conditions environnementales et variabilité](#);
- [Protection des fleurs contre le gel](#).

Merci à nos partenaires financiers et de projet

PARTENARIAT
CANADIEN pour
l'AGRICULTURE

Canada Québec

Dubois
Agrinovation

Nutrableu

TURFCARE

Bleuetière Coopérative de Normandin

Bleuets Boréales Normandin



Des questions?

Carl Boivin, chercheur à l'IRDA
418 643-2380 p. 430
carl.boivin@irda.qc.ca

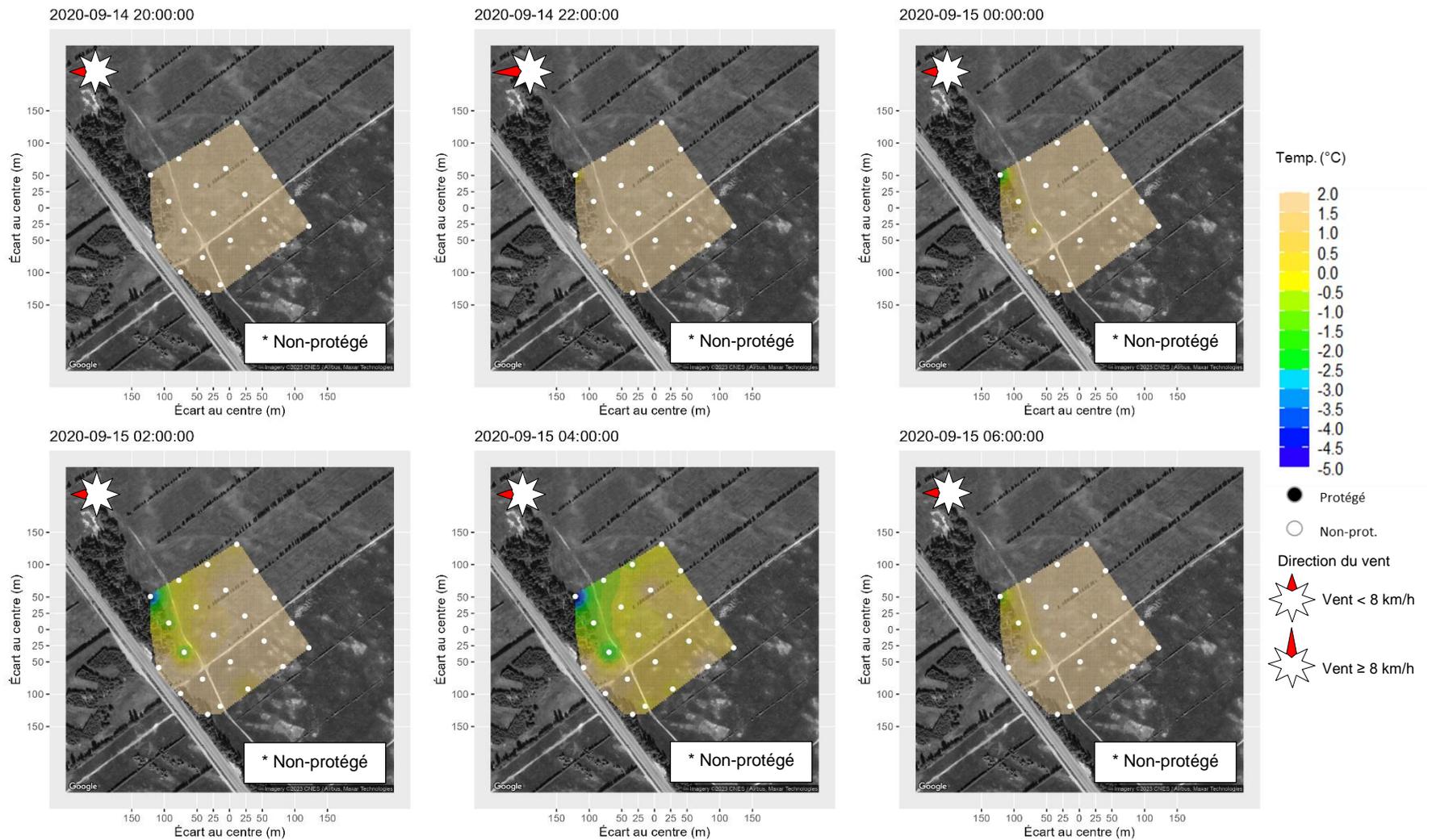
Figure 157. Résumé produit à la suite de la journée « Portes ouvertes » du 20 septembre 2022 à Normandin.

Annexe 8. Cartes thermiques

Machine à vent

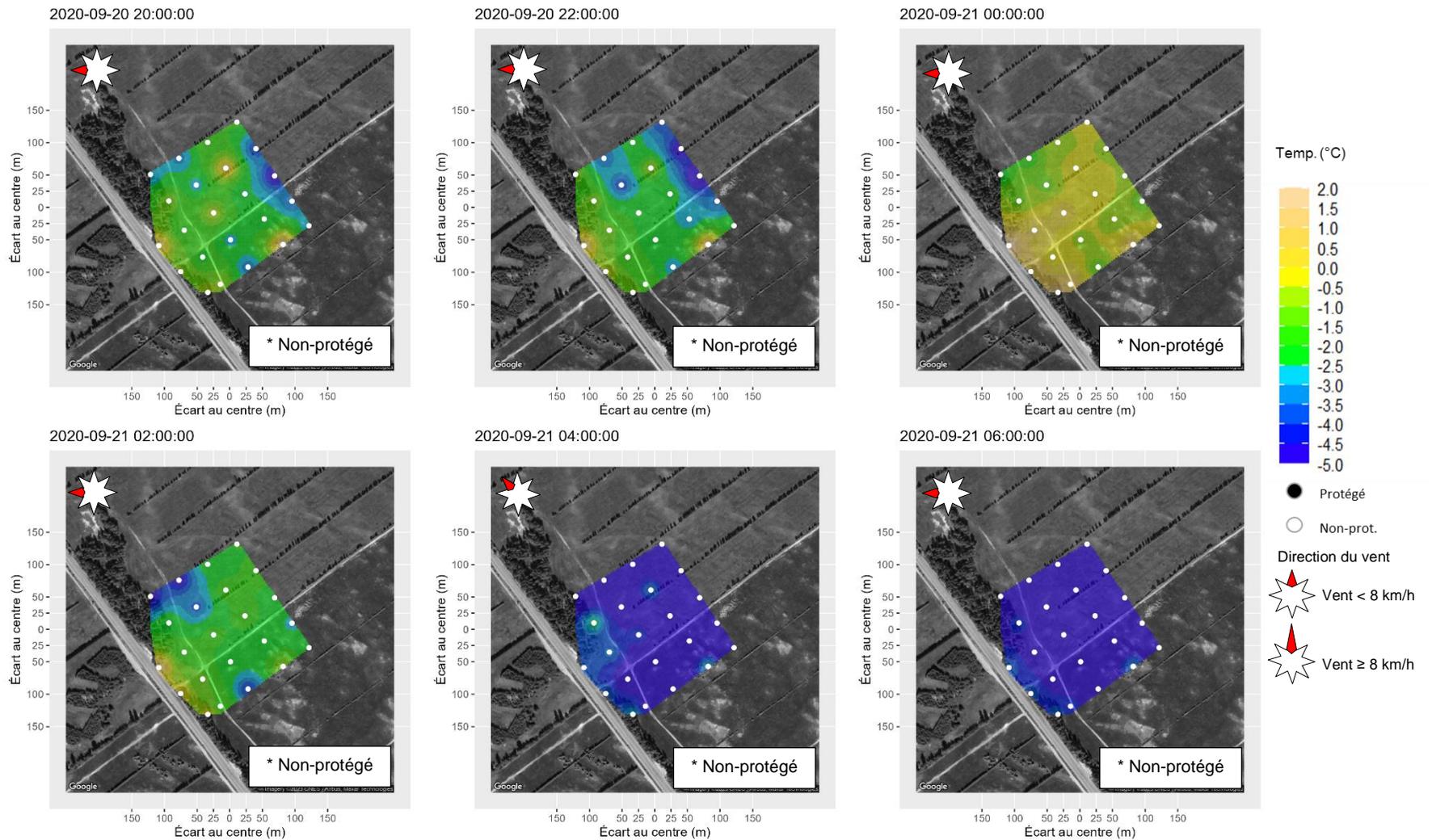


Figure 158. Au site « machine à vent », courbes de niveau du site 2020 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.



*Aucune protection en 2020 au site machine, seulement une tour installée pour mesurer le profil des températures.

Figure 159. Au site « machine à vent » la nuit du 14 au 15 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

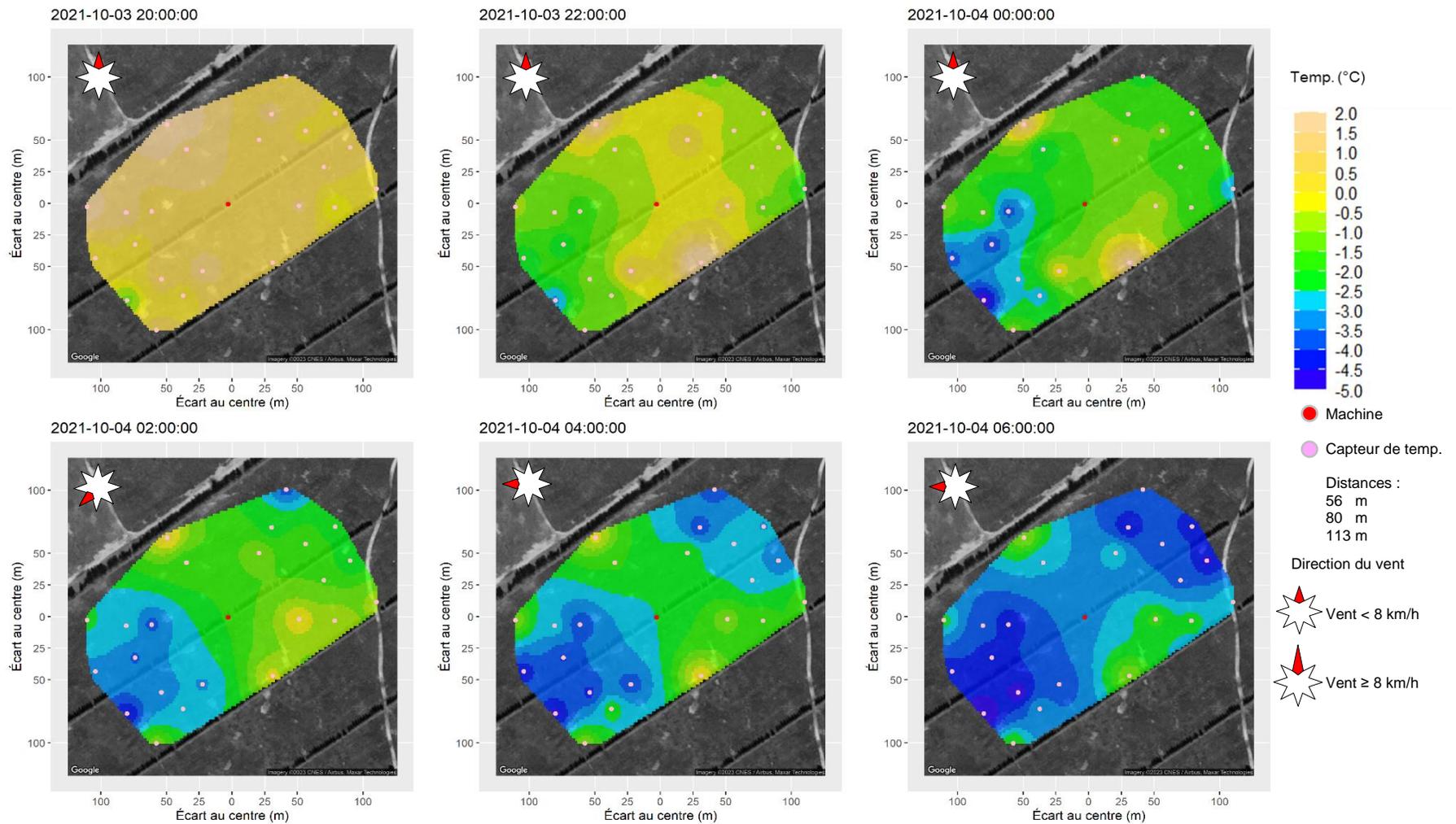


*Aucune protection en 2020 au site machine, seulement une tour installée pour mesurer le profil des températures.

Figure 160. Au site « machine à vent » la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

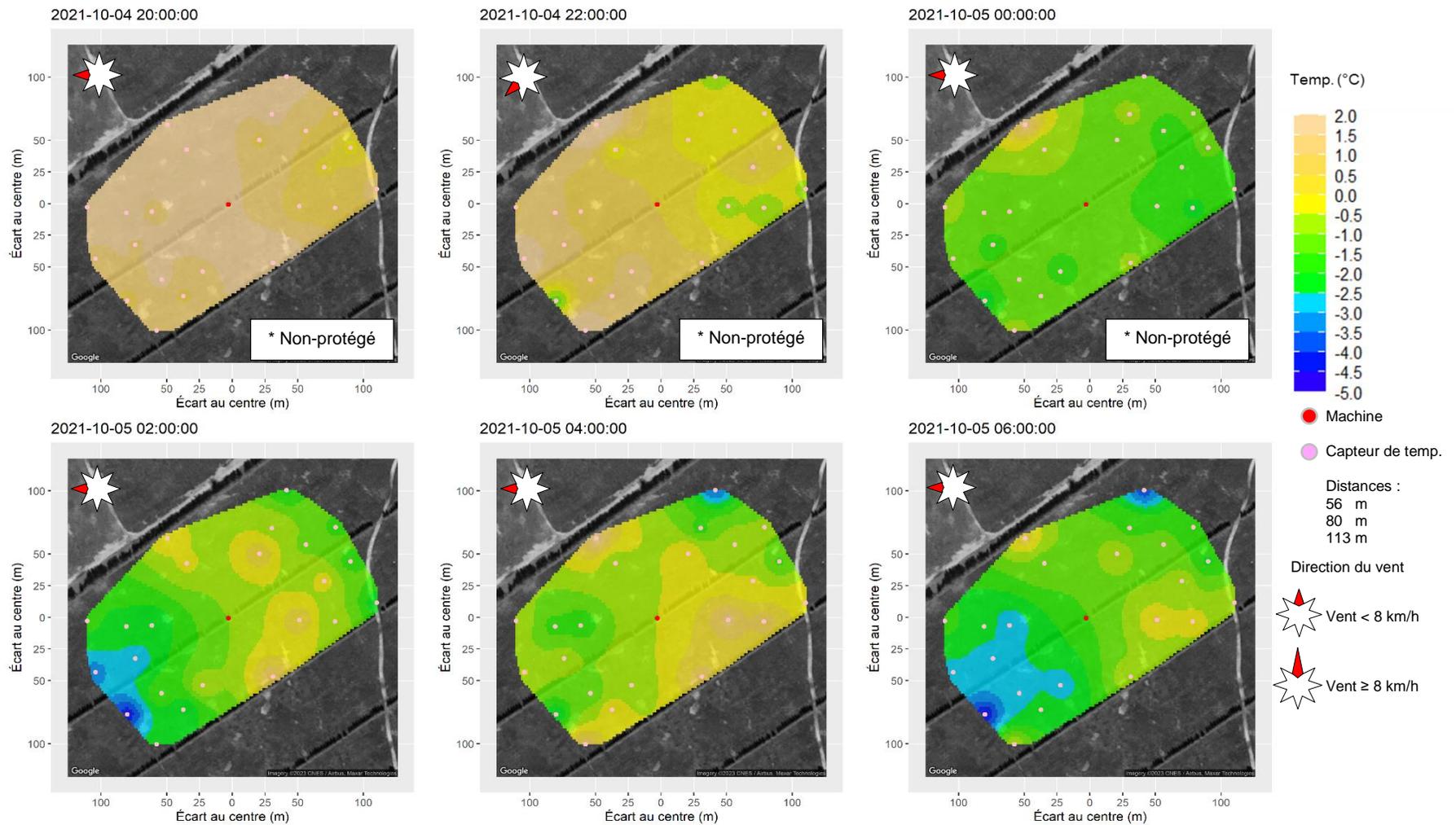


Figure 161. Au site « machine à vent », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Il n’y a pas de présence de cuvette sur ce site.



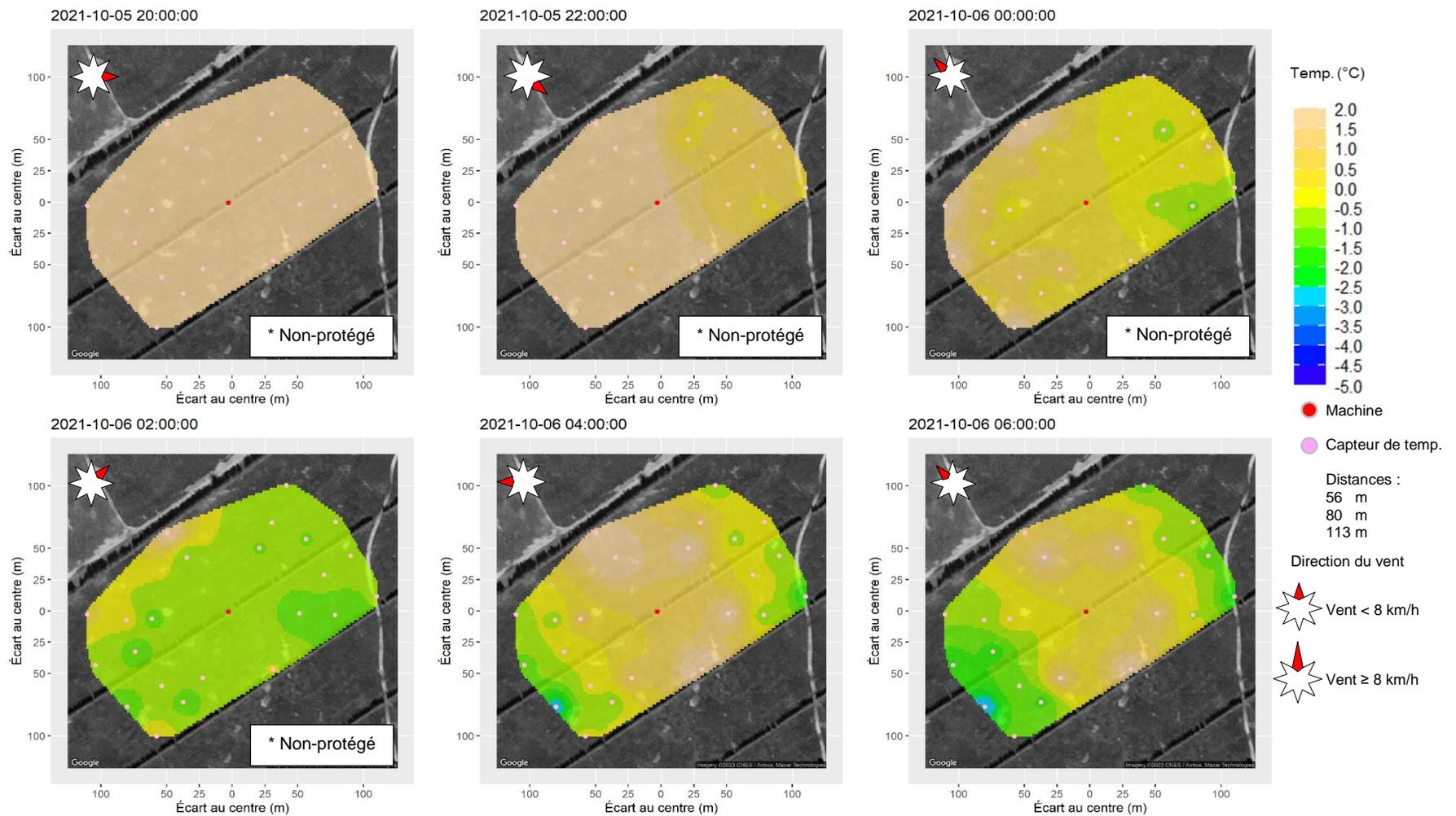
* Déploiement de la machine à 18 h 50.

Figure 162. Au site « machine à vent » la nuit du 3 au 4 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



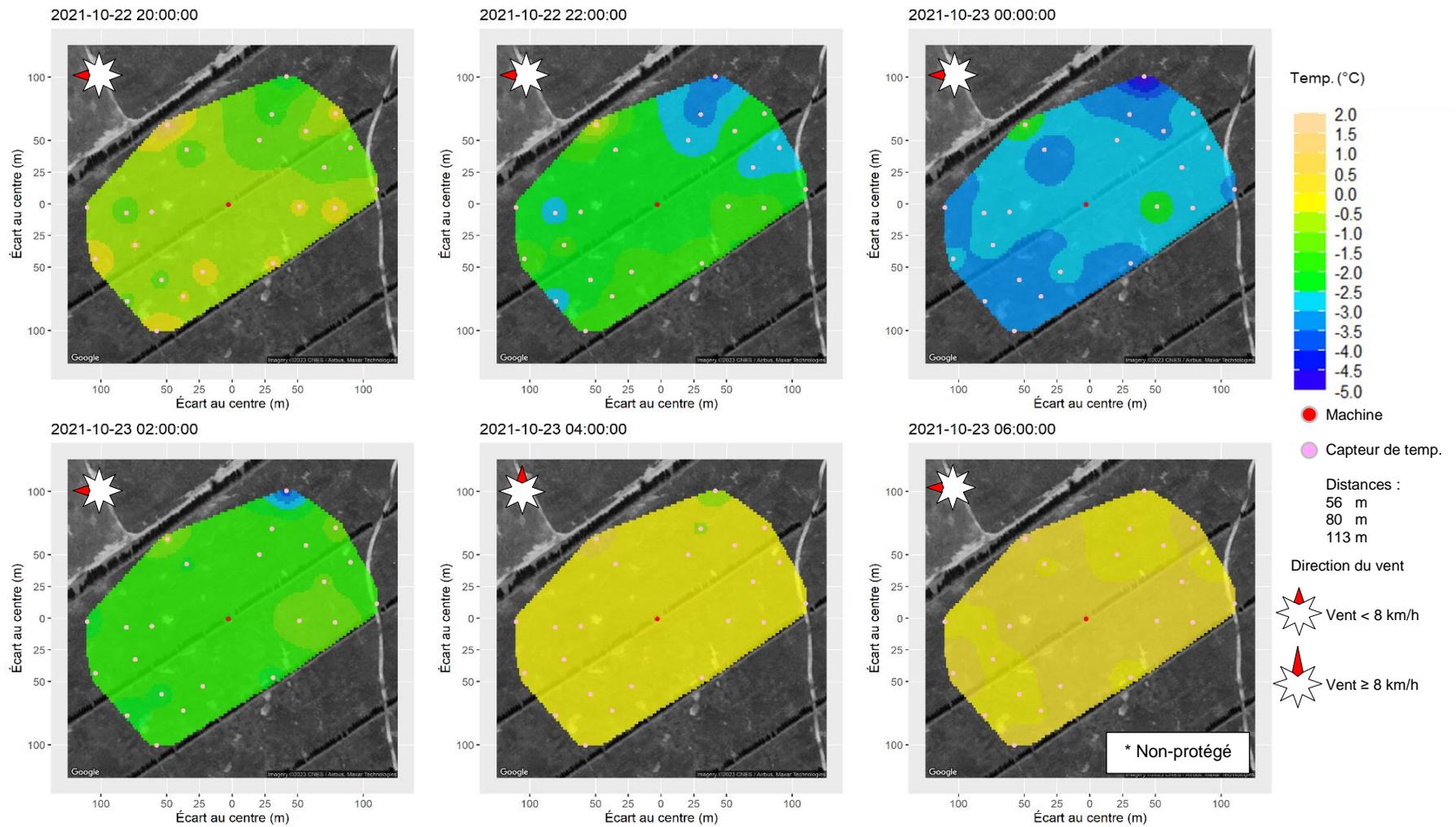
* Déploiement de la machine à 00 h 55.

Figure 163. Au site « machine à vent » la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



* Déploiement de la machine à 02 h 30.

Figure 164. Au site « machine à vent » la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

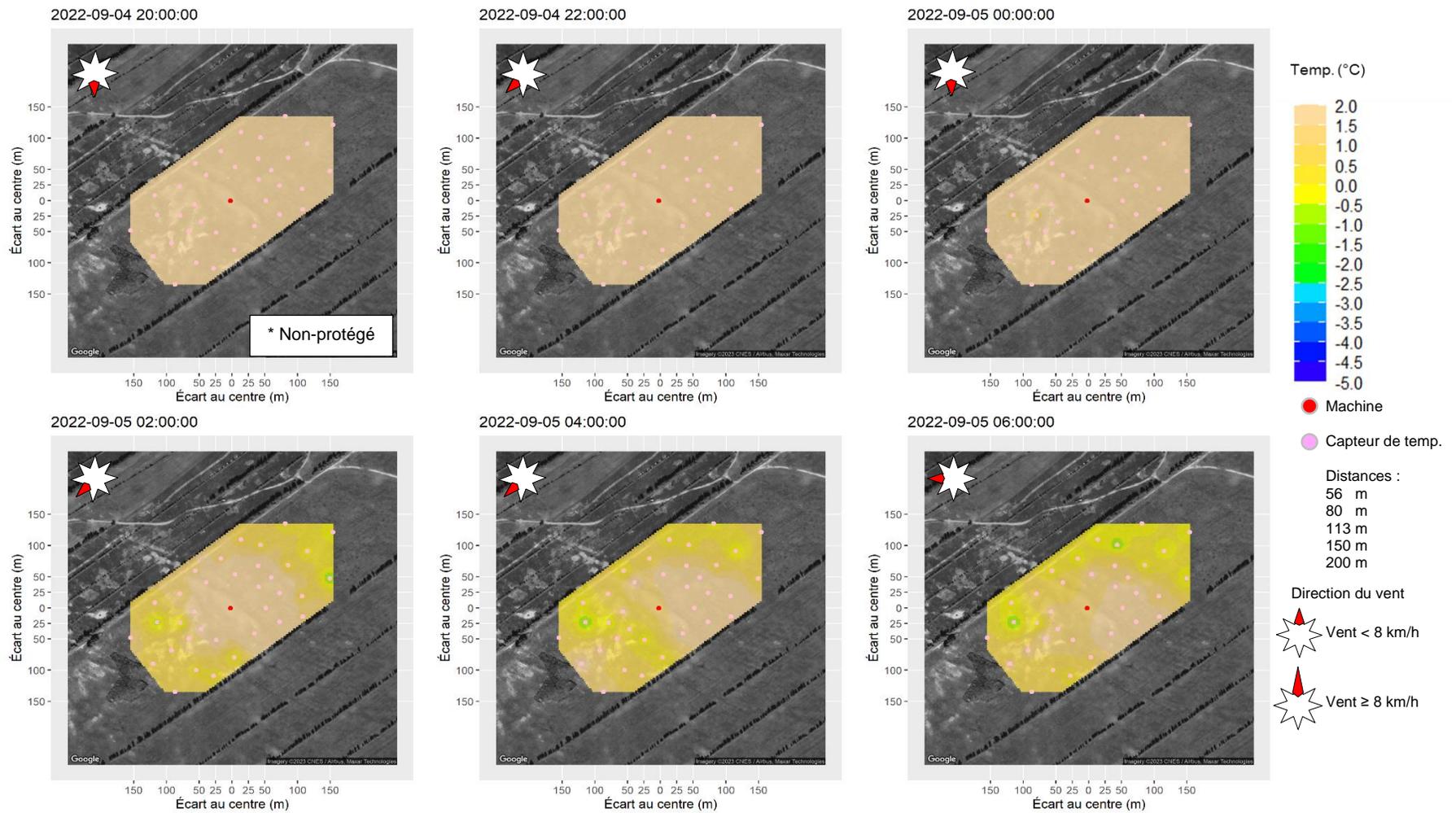


* Déploiement de la machine à 18 h 55.

Figure 165. Au site « machine à vent » la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

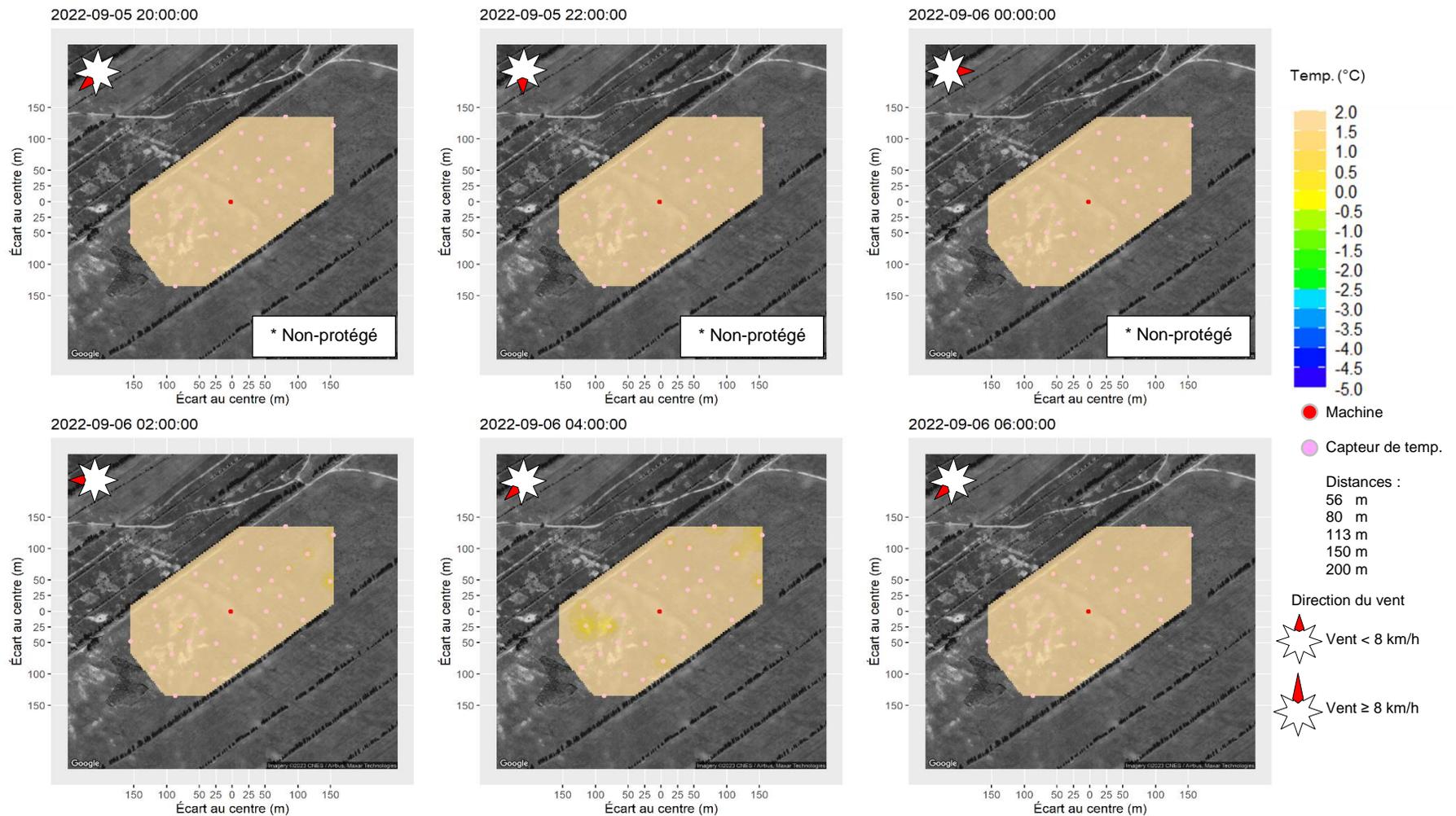


Figure 166. Au site « machine à vent », courbes de niveau du site 2022 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.



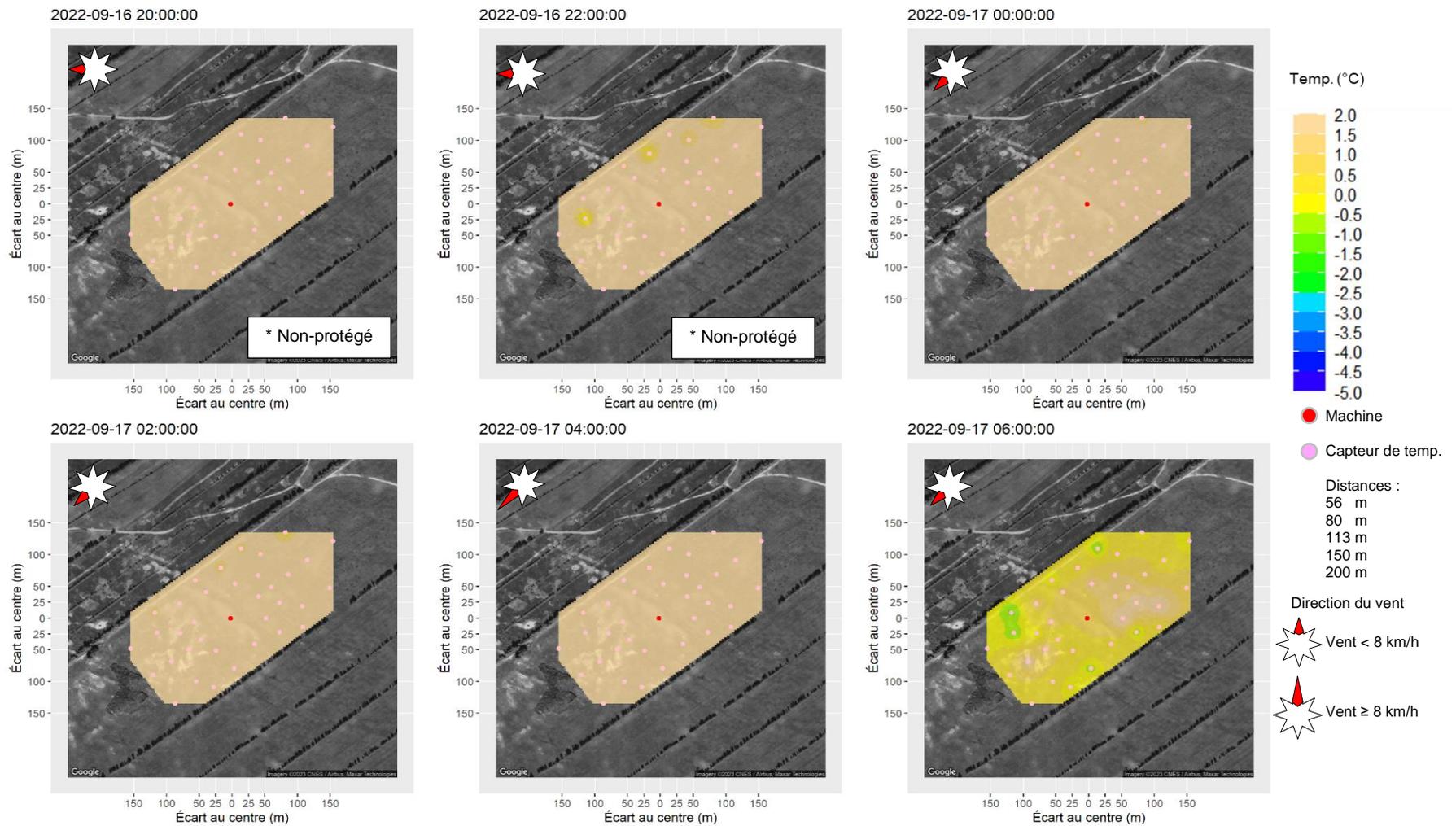
* Déploiement de la machine à 21 h 00.

Figure 167. Au site « machine à vent » la nuit du 4 au 5 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



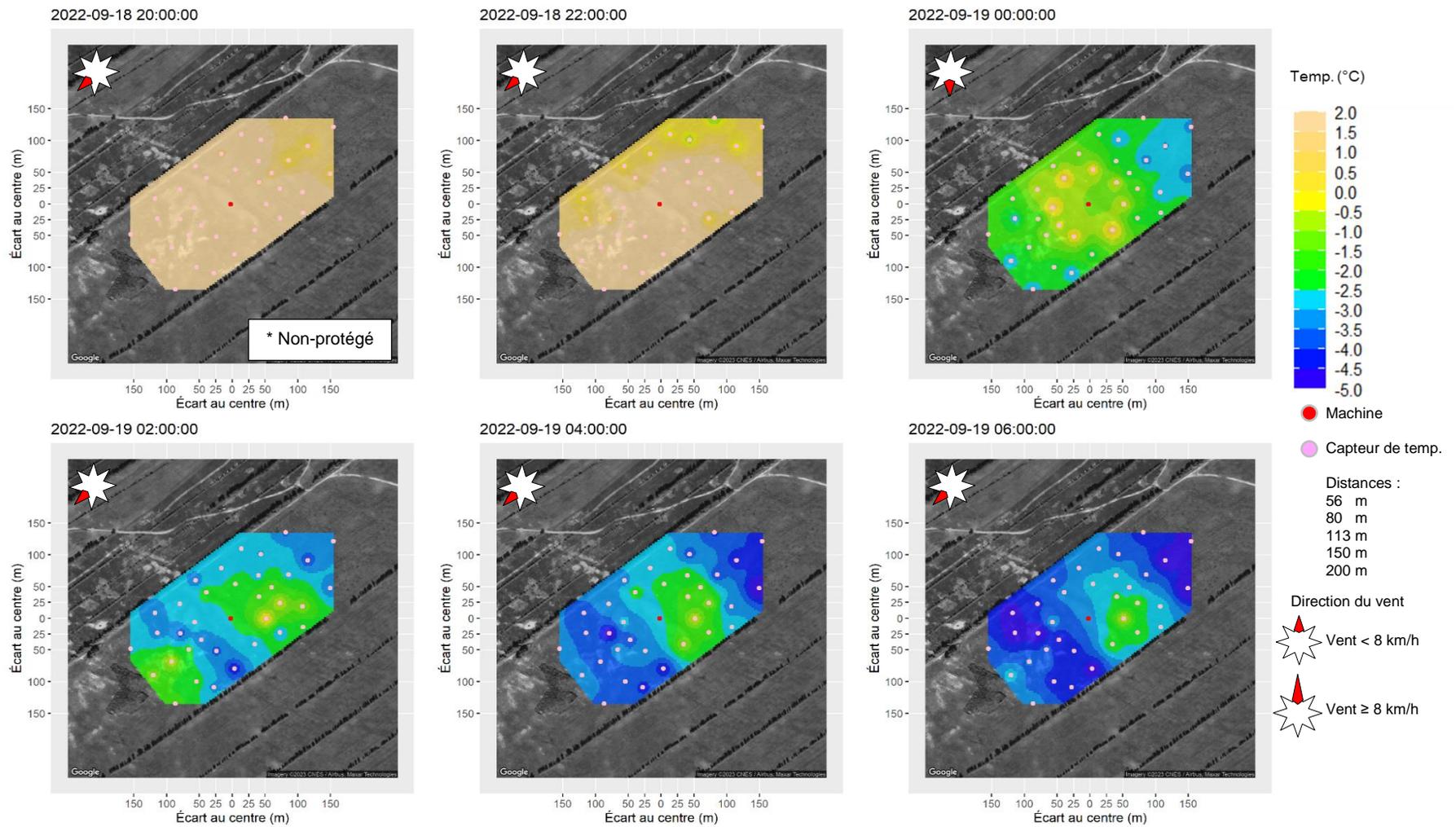
* Déploiement de la machine à 00 h 30.

Figure 168. Au site « machine à vent » la nuit du 5 au 6 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



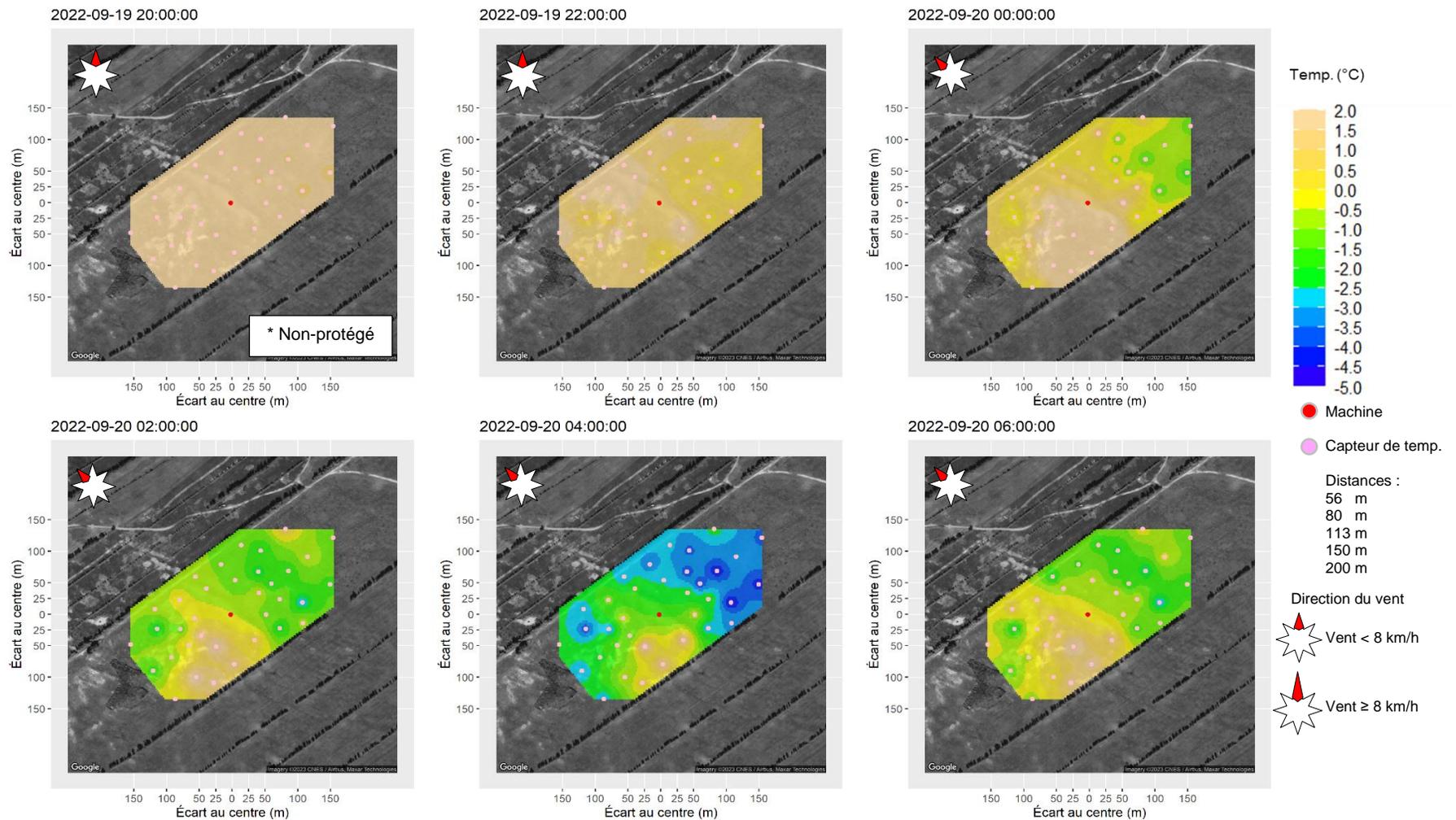
* Déploiement de la machine à 22 h 16.

Figure 169. Au site « machine à vent » la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



* Déploiement de la machine à 20 h 47.

Figure 170. Au site « machine à vent » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



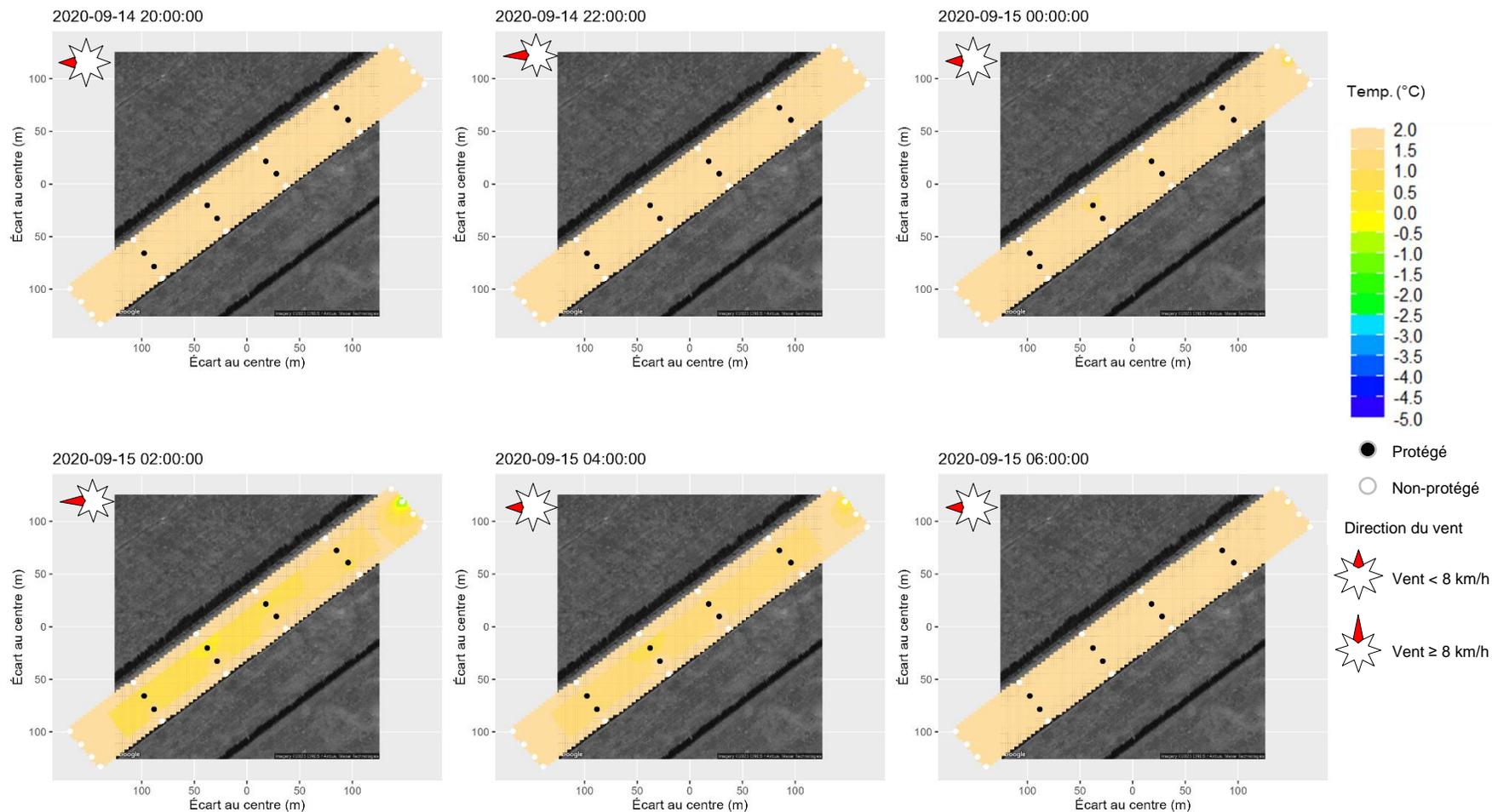
* Déploiement de la machine à 21 h 47.

Figure 171. Au site « machine à vent » la nuit du 19 au 20 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits. Distance à la machine :

Bâche

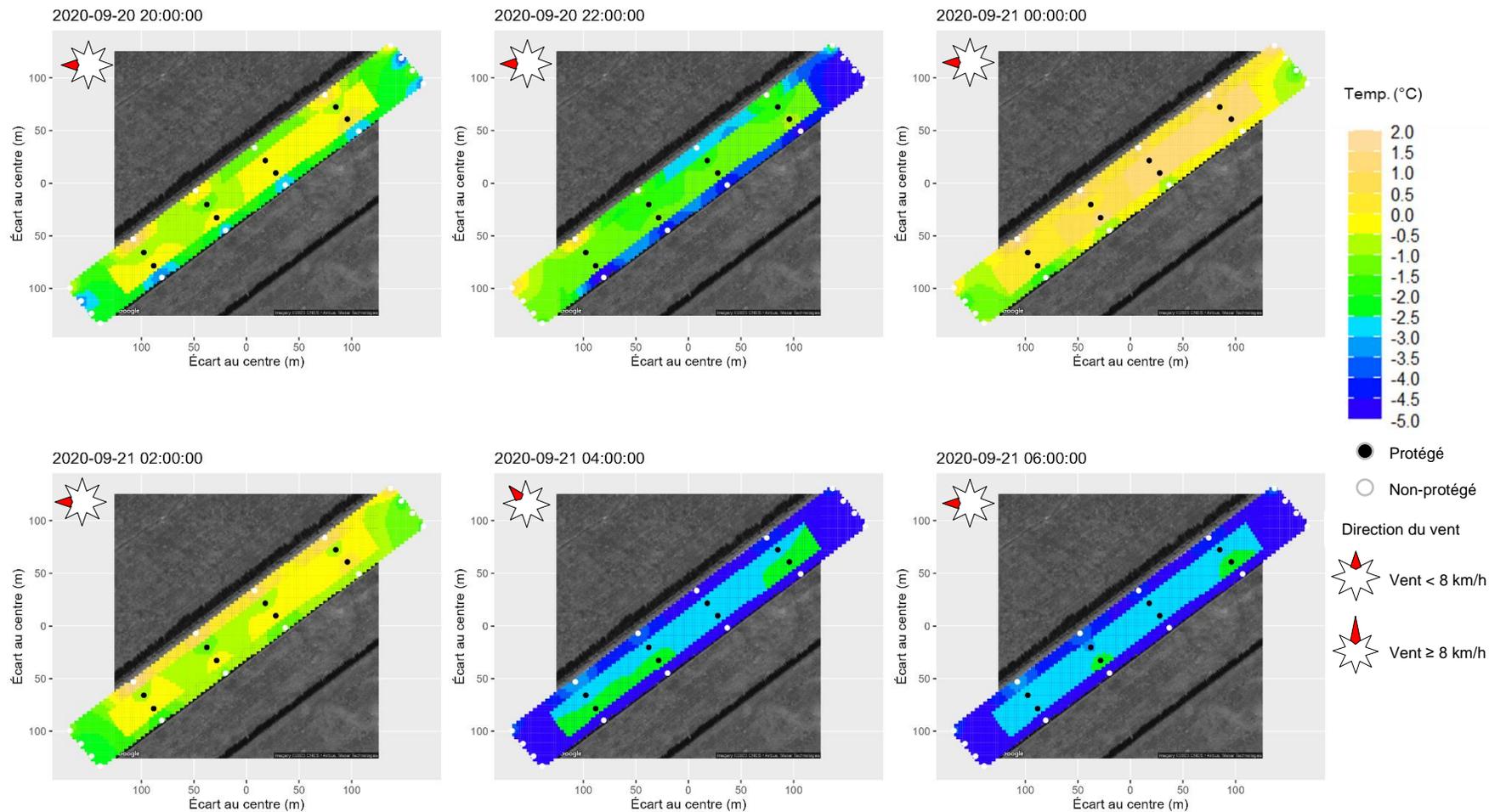


Figure 172. Au site « bache 19 g/m² », courbes de niveau du site 2020 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.



N.B. Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche et autour de la bâche.

Figure 173. Au site « bâche 19 g/m² » la nuit du 14 au 15 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



N.B. Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche et autour de la bâche.

Figure 174. Au site « bâche 19 g/m² » la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

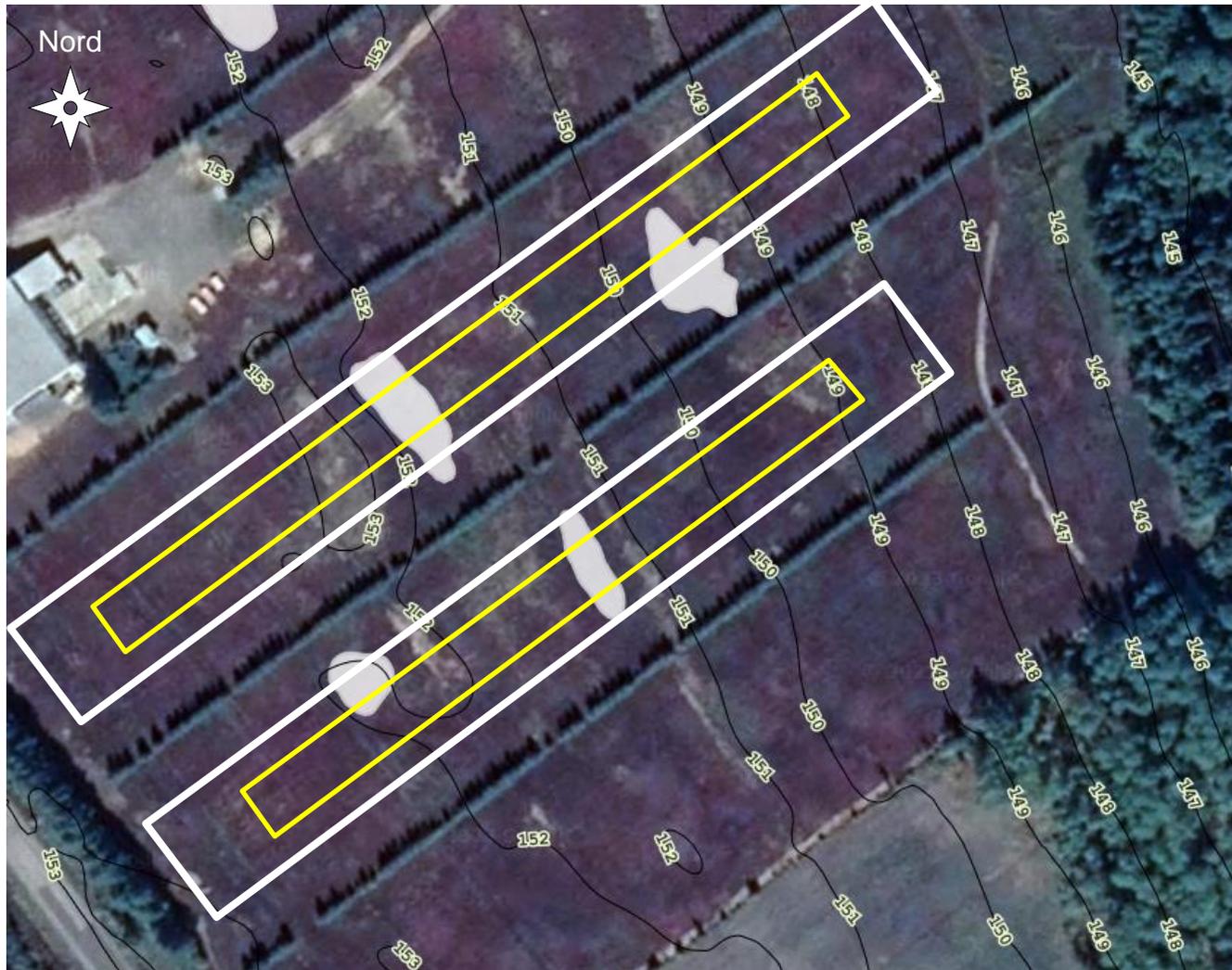
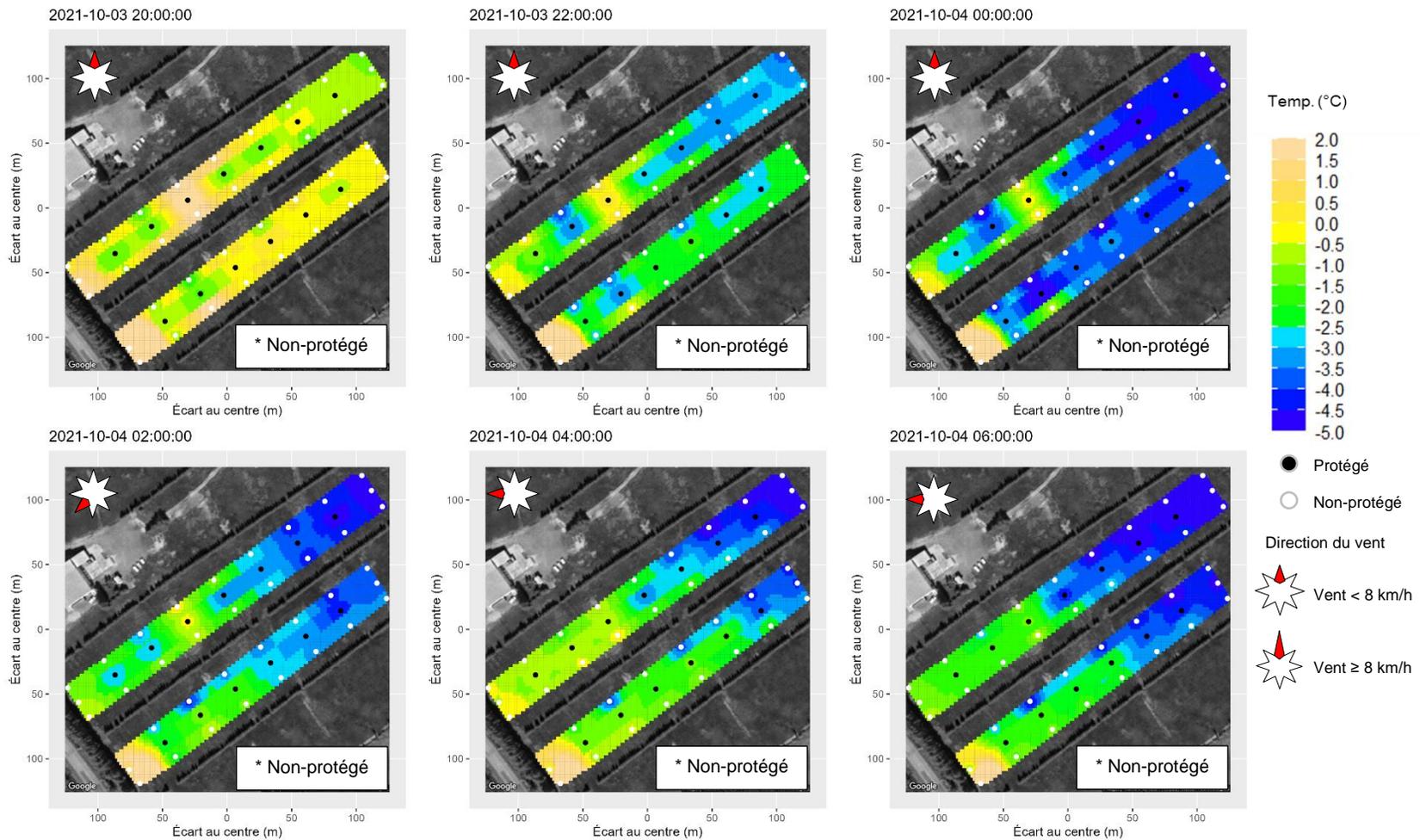
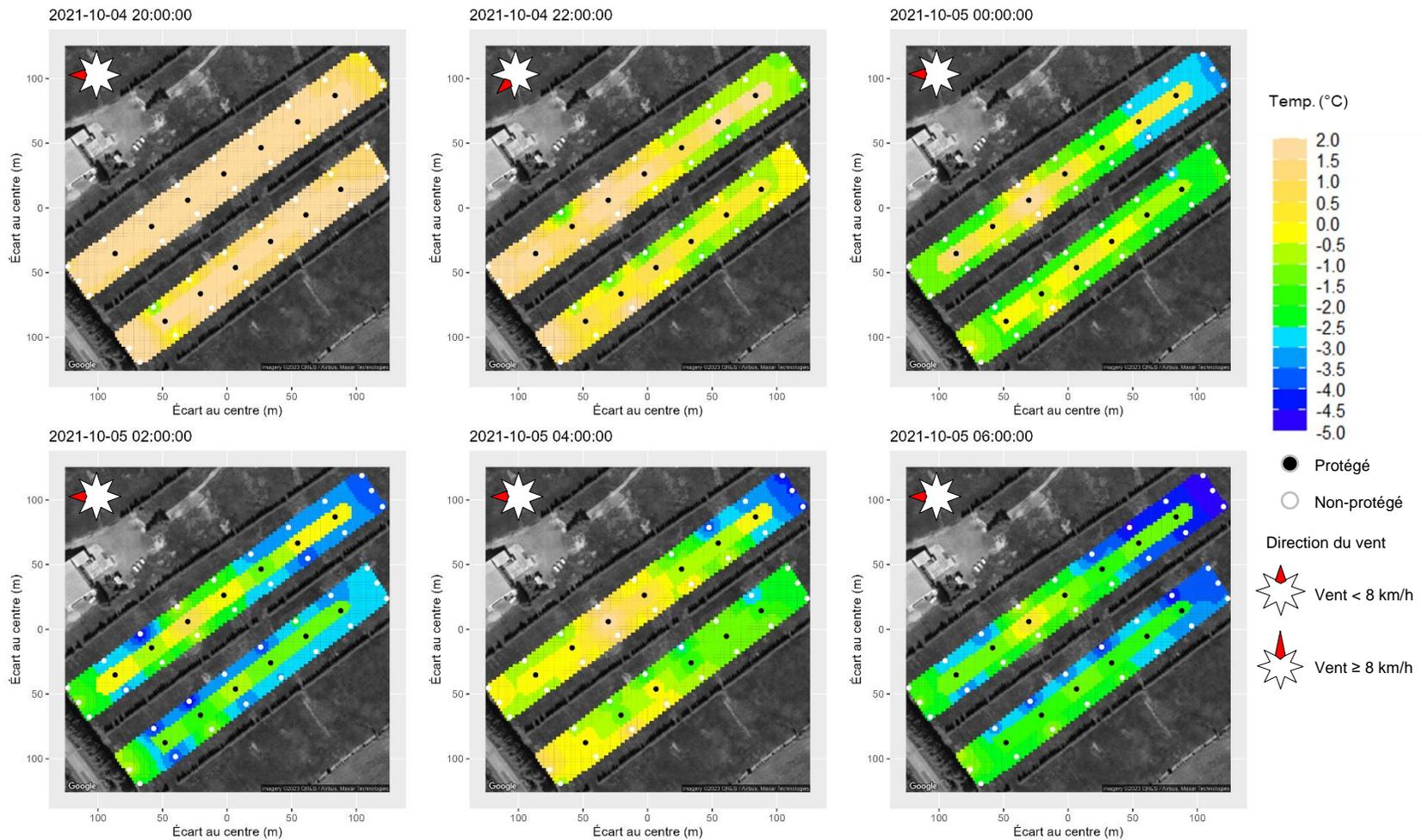


Figure 175. Aux sites « bâche 19 g/m² » et « bâche 38 g/m² », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.



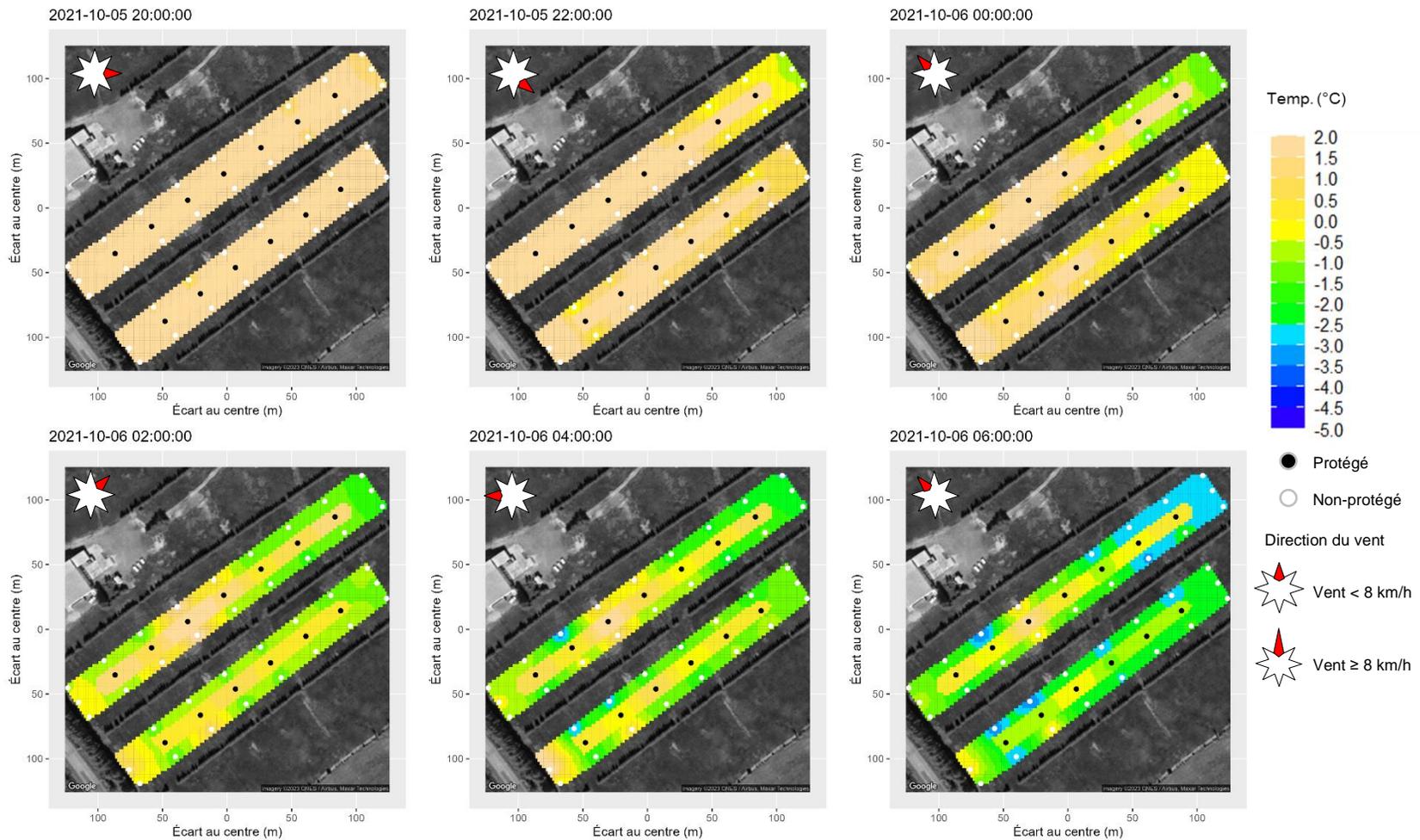
N.B. 1 : Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche et autour de la bâche.
 N.B. 2 : Bâches de haut en bas : (haut) $2 \times 19 \text{ g/m}^2$ pour un total de 38 g/m^2 , (bas) 19 g/m^2 .

Figure 176. Aux sites « bâche 19 g/m^2 » et « bâche 38 g/m^2 » la nuit du 3 au 4 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits. La bâche n'était pas encore installée à cette date.



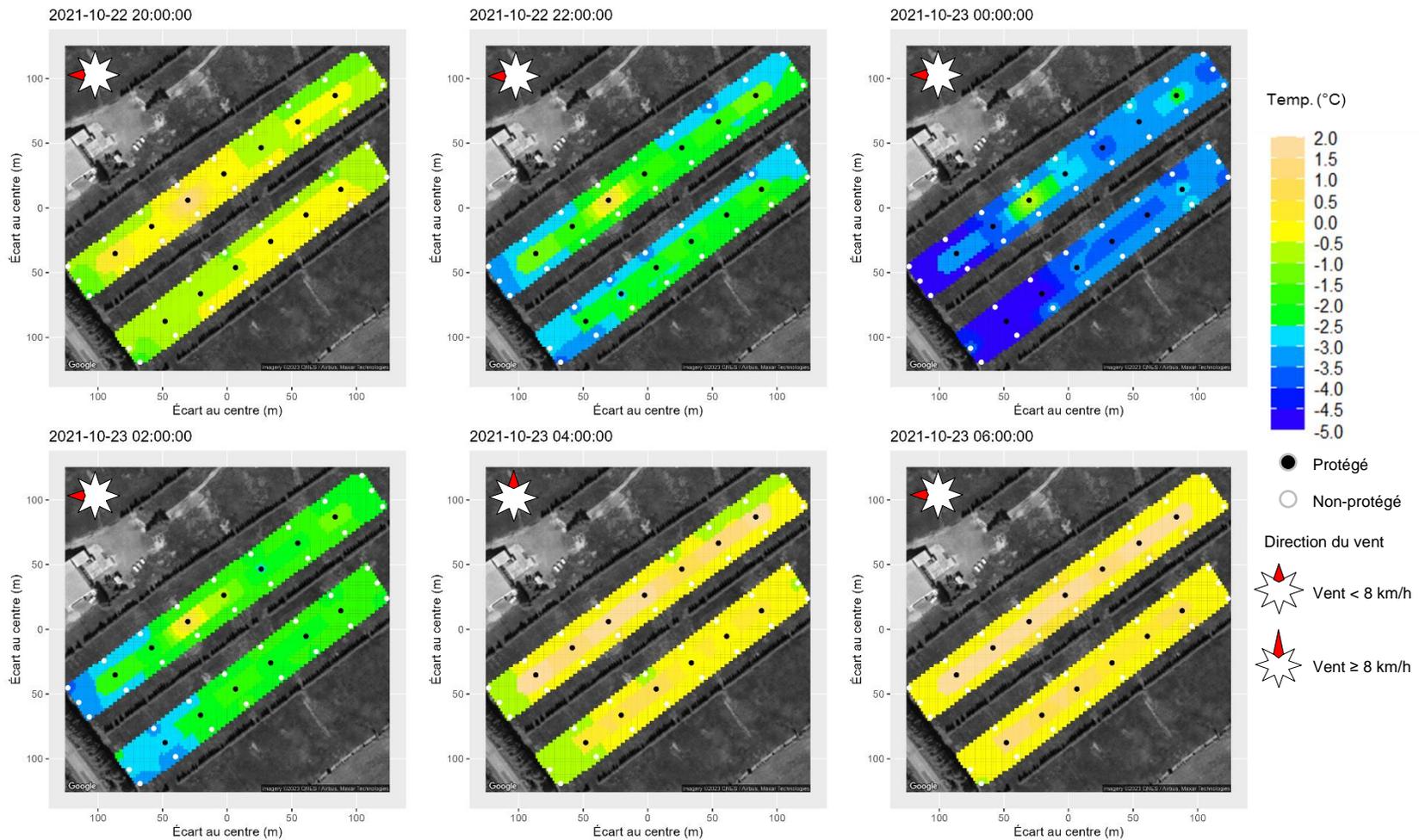
N.B. 1 : Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche et autour de la bâche.
 N.B. 2 : Bâches de haut en bas : (haut) 2 x 19 g/m² pour un total de 38 g/m², (bas) 19 g/m².

Figure 177. Aux sites « bâche 19 g/m² » et « bâche 38 g/m² » la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits. Bâche installée le 4 octobre, en avant-midi.



N.B. 1 : Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche et autour de la bâche.
 N.B. 2 : Bâches de haut en bas : (haut) 2 x 19 g/m² pour un total de 38 g/m², (bas) 19 g/m².

Figure 178. Aux sites « bâche 19 g/m² » et « bâche 38 g/m² » la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



N.B. 1 : Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche et autour de la bâche.
 N.B. 2 : Bâches de haut en bas : (haut) 2 x 19 g/m² pour un total de 38 g/m², (bas) 19 g/m².

Figure 179. Aux sites « bâche 19 g/m² » et « bâche 38 g/m² » la nuit du 22 au 23 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

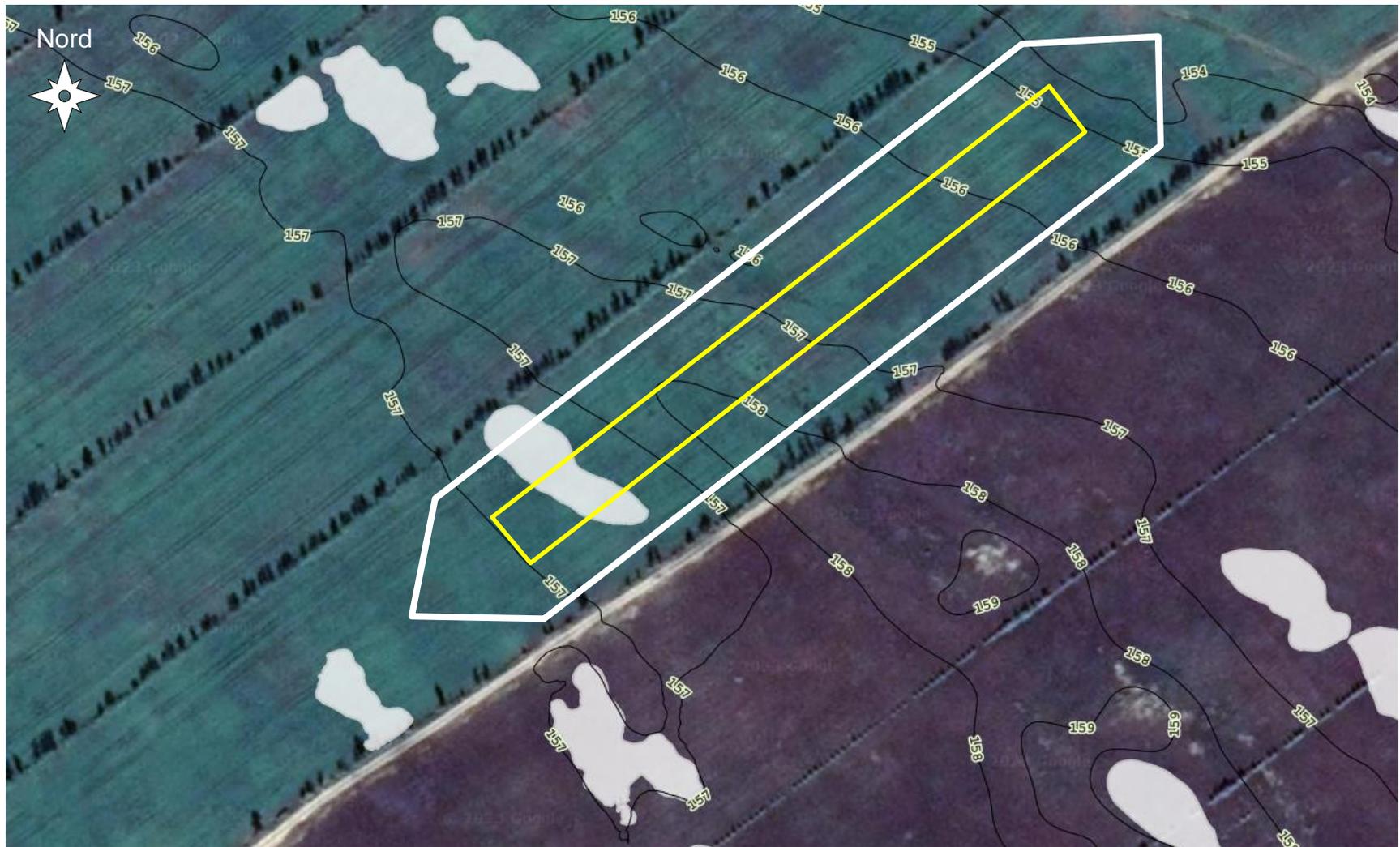
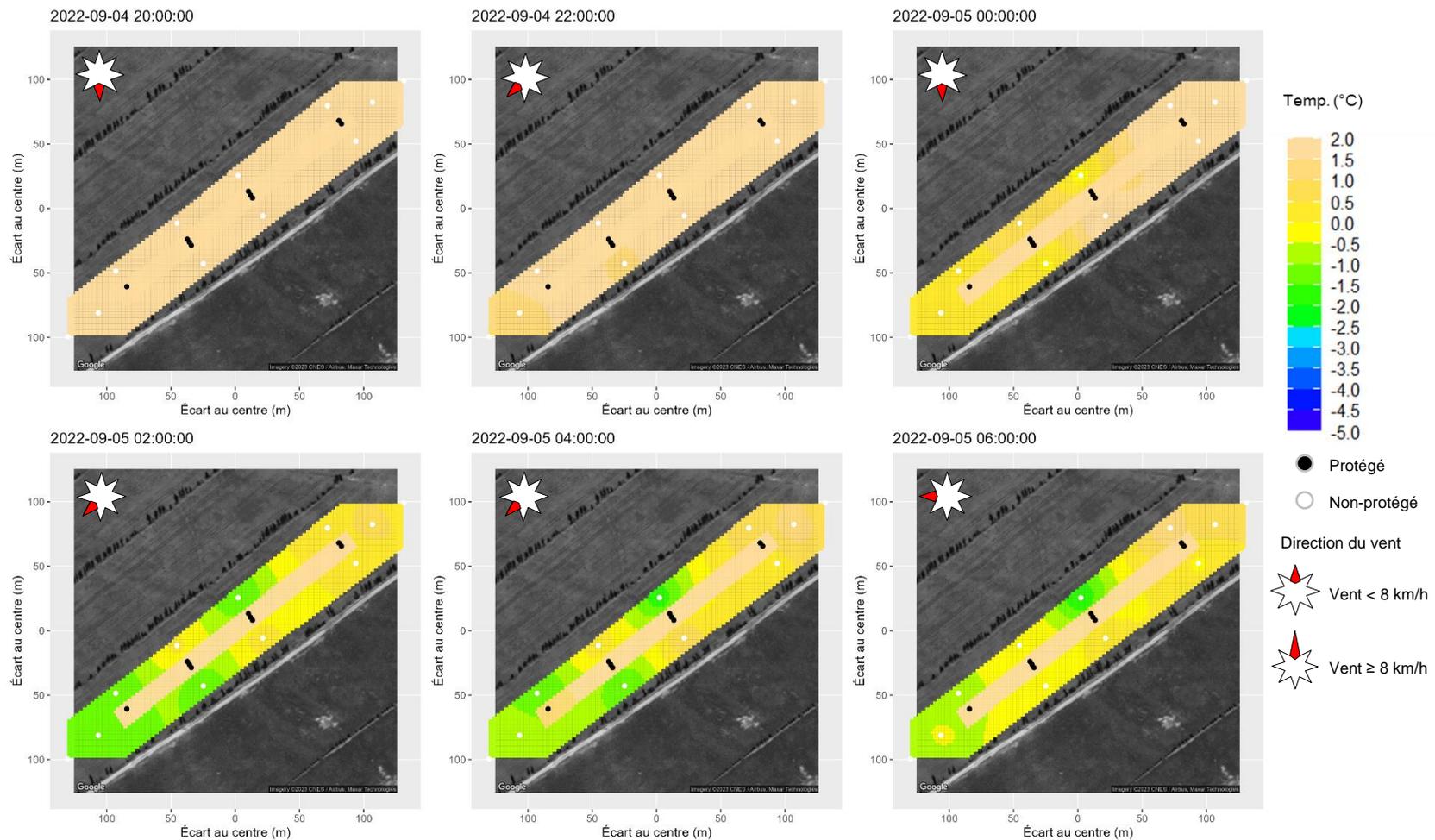
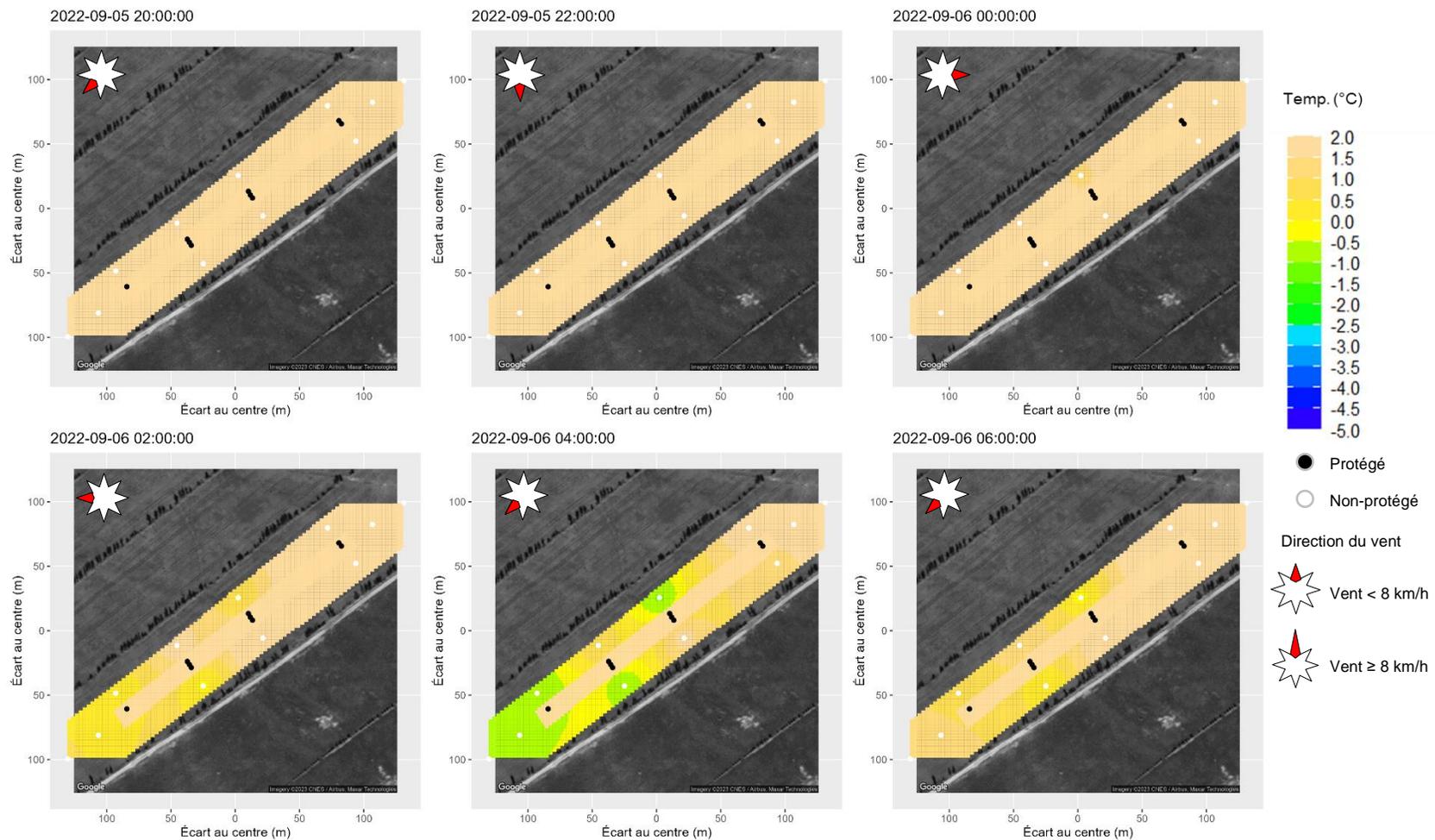


Figure 180. Au site « bêche 38 g/m² », courbes de niveau du site 2022 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.



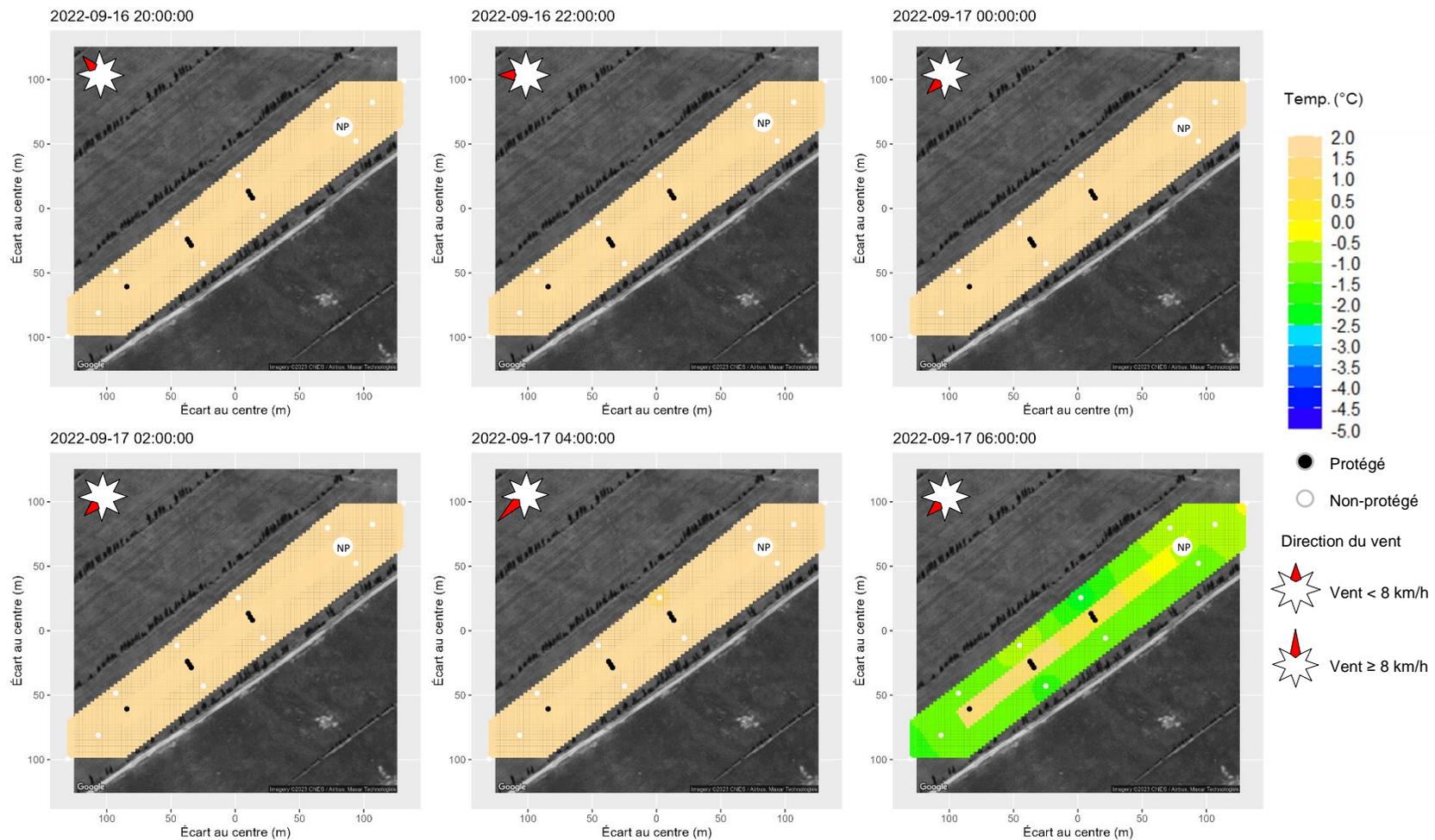
N.B. : Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche et autour de la bâche.

Figure 181. Au site « bâche 38 g/m² » la nuit du 4 au 5 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



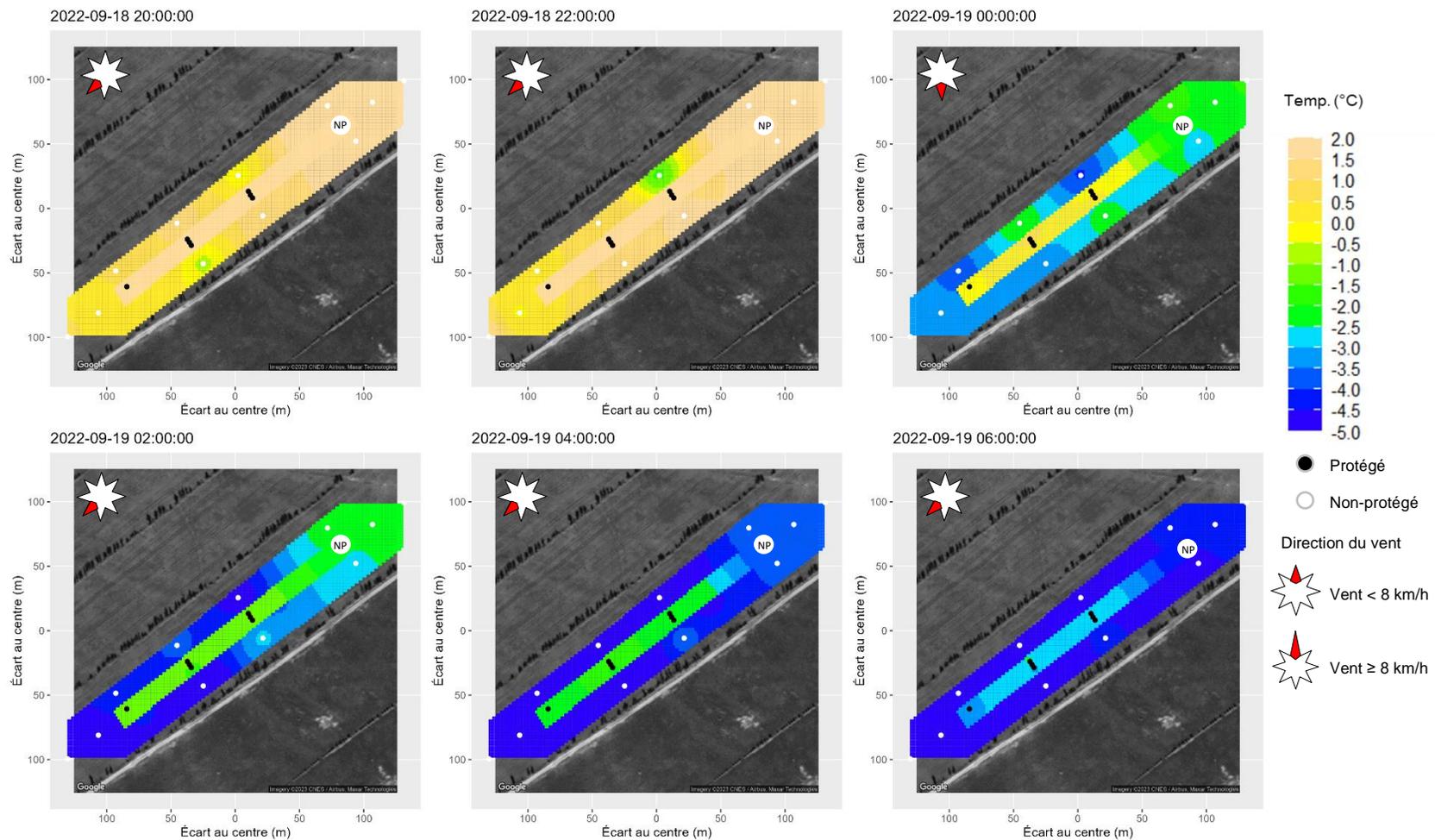
N.B. : Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche et autour de la bâche.

Figure 182. Au site « bâche 38 g/m² » la nuit du 5 au 6 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



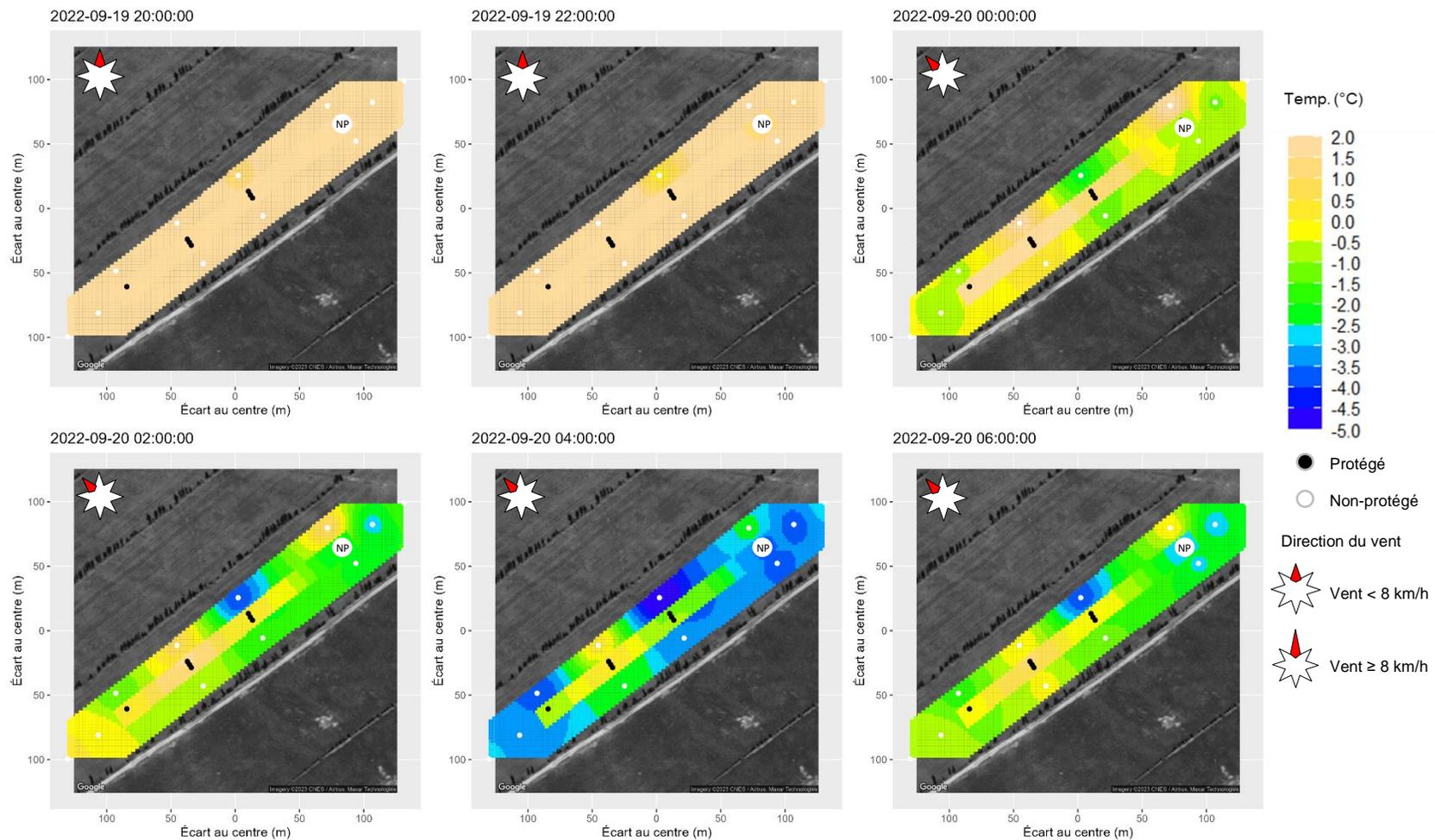
N.B. 1: Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche (zone théorique) et autour de la bâche.
 N.B. 2: Les 3 sondes à l'extrémité nord (identifiées NP) n'était plus protégées à partir du 16 septembre (bâche déchirée).

Figure 183. Au site « bâche 38 g/m² » la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



N.B. 1: Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche (zone théorique) et autour de la bâche.
 N.B. 2: Les 3 sondes à l'extrémité nord (identifiées NP) n'était plus protégées à partir du 16 septembre (bâche déchirée).

Figure 184. Au site « bâche 38 g/m² » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



N.B. 1: Des polygones distincts ont été utilisés pour l'interpolation sous la bâche (zone théorique) et autour de la bâche.
 N.B. 2: Les 3 sondes à l'extrémité nord (identifiées NP) n'était plus protégées à partir du 16 septembre (bâche déchirée).

Figure 185. Au site « bâche 38 g/m² » la nuit du 19 au 20 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

Brise-vent

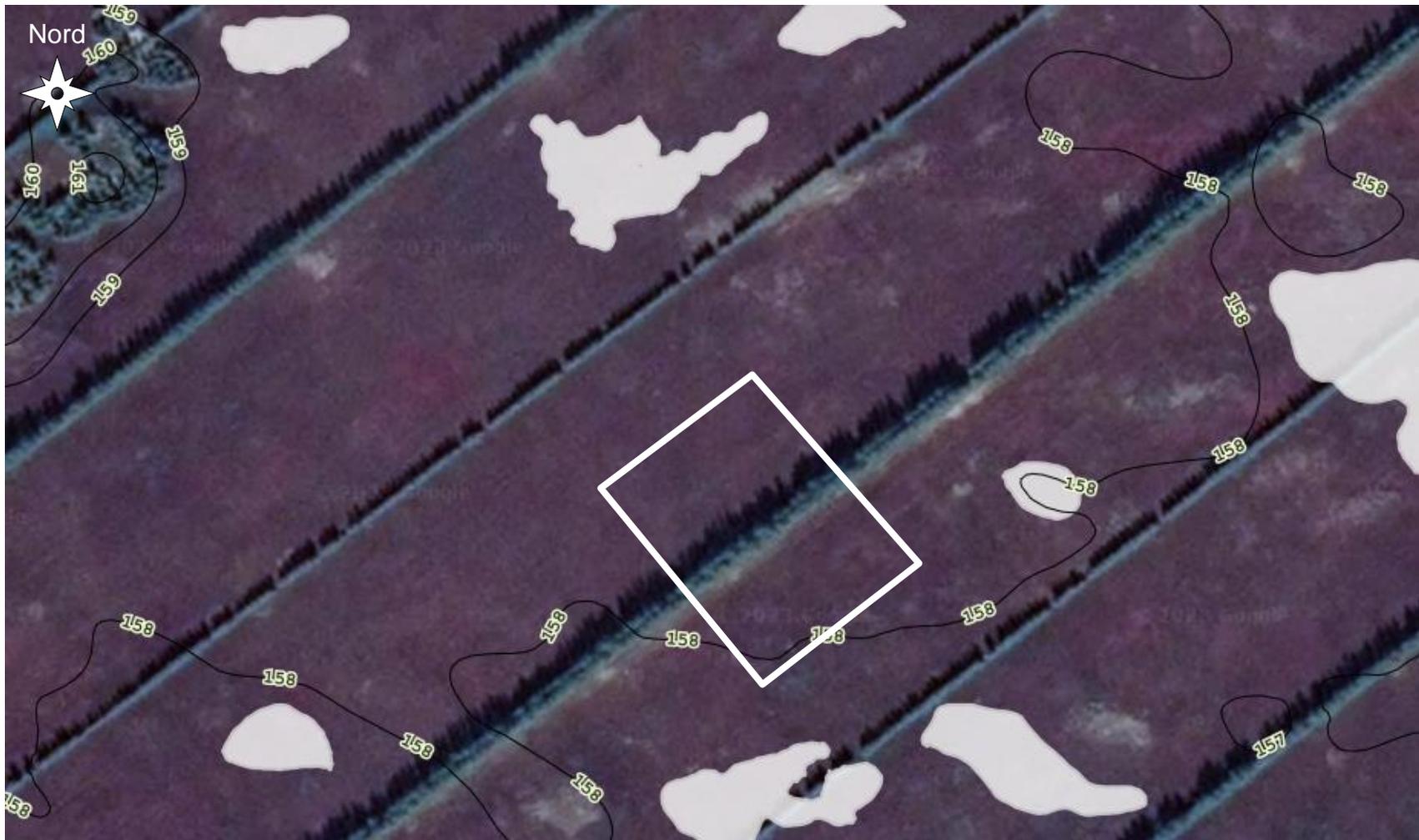


Figure 186. Au site « brise-vent », courbes de niveau du site 2020 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.

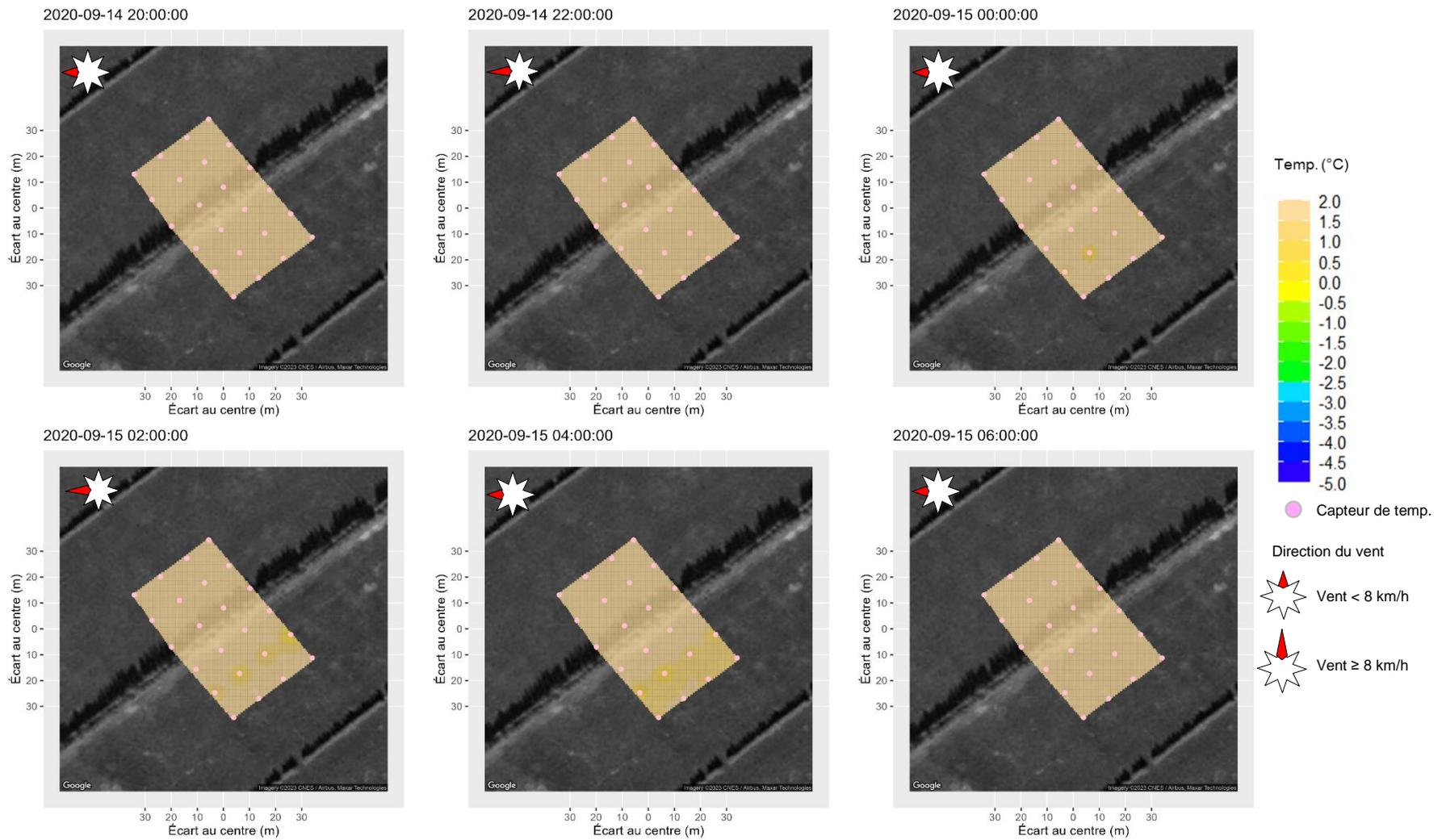


Figure 187. Au site « brise-vent » la nuit du 14 au 15 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

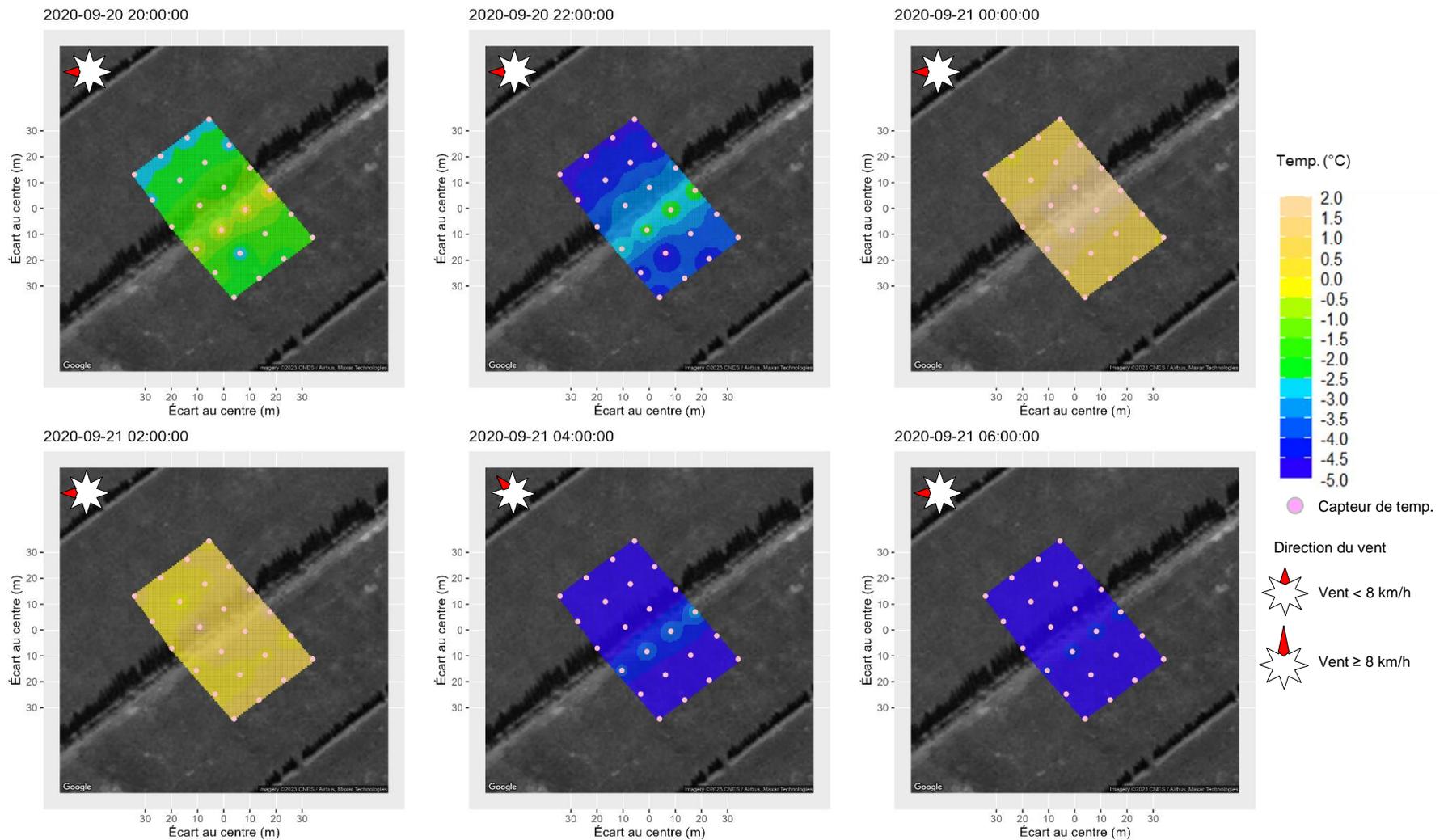


Figure 188. Au site « brise-vent » la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

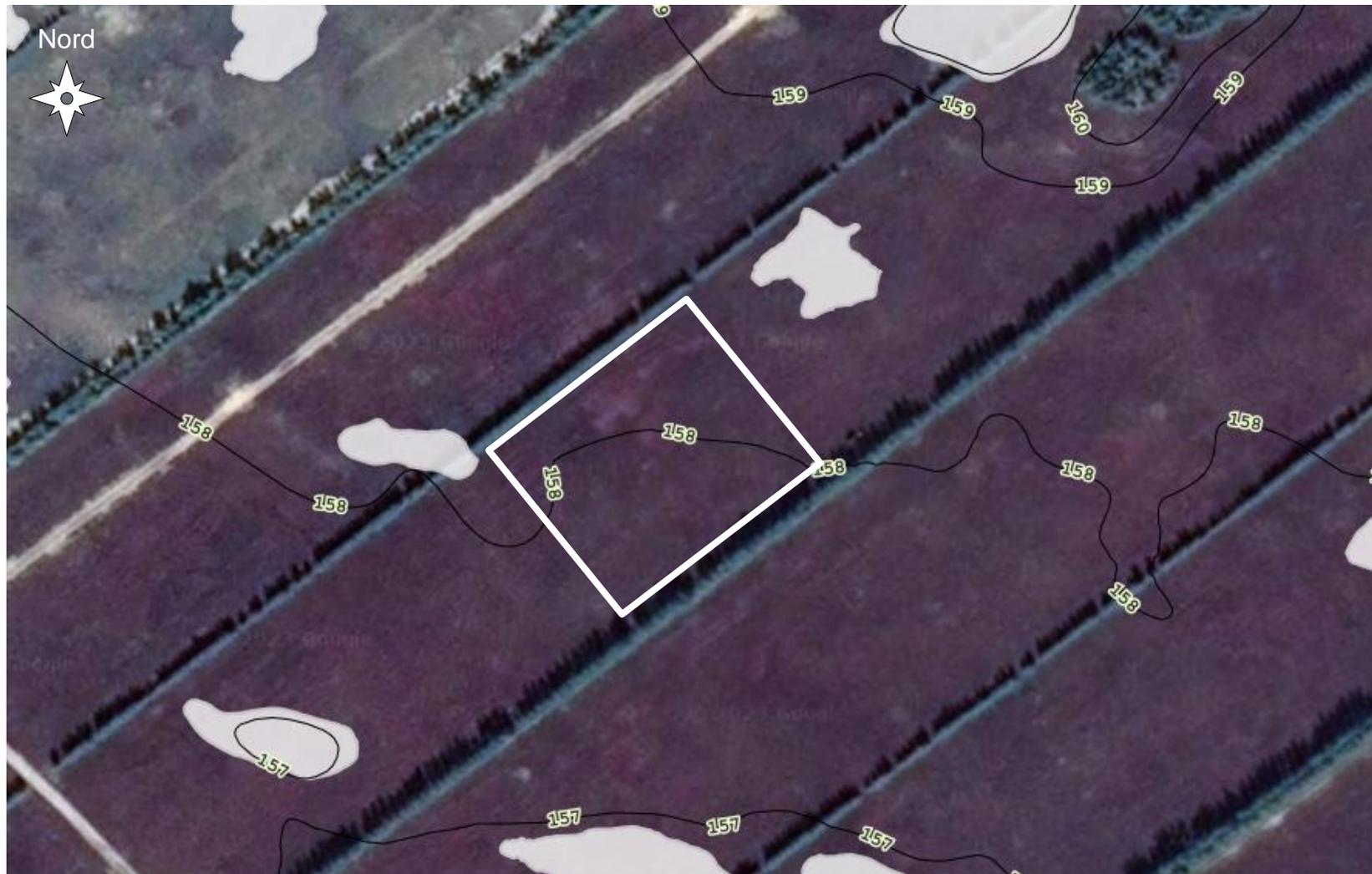


Figure 189. Au site « brise-vent », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.

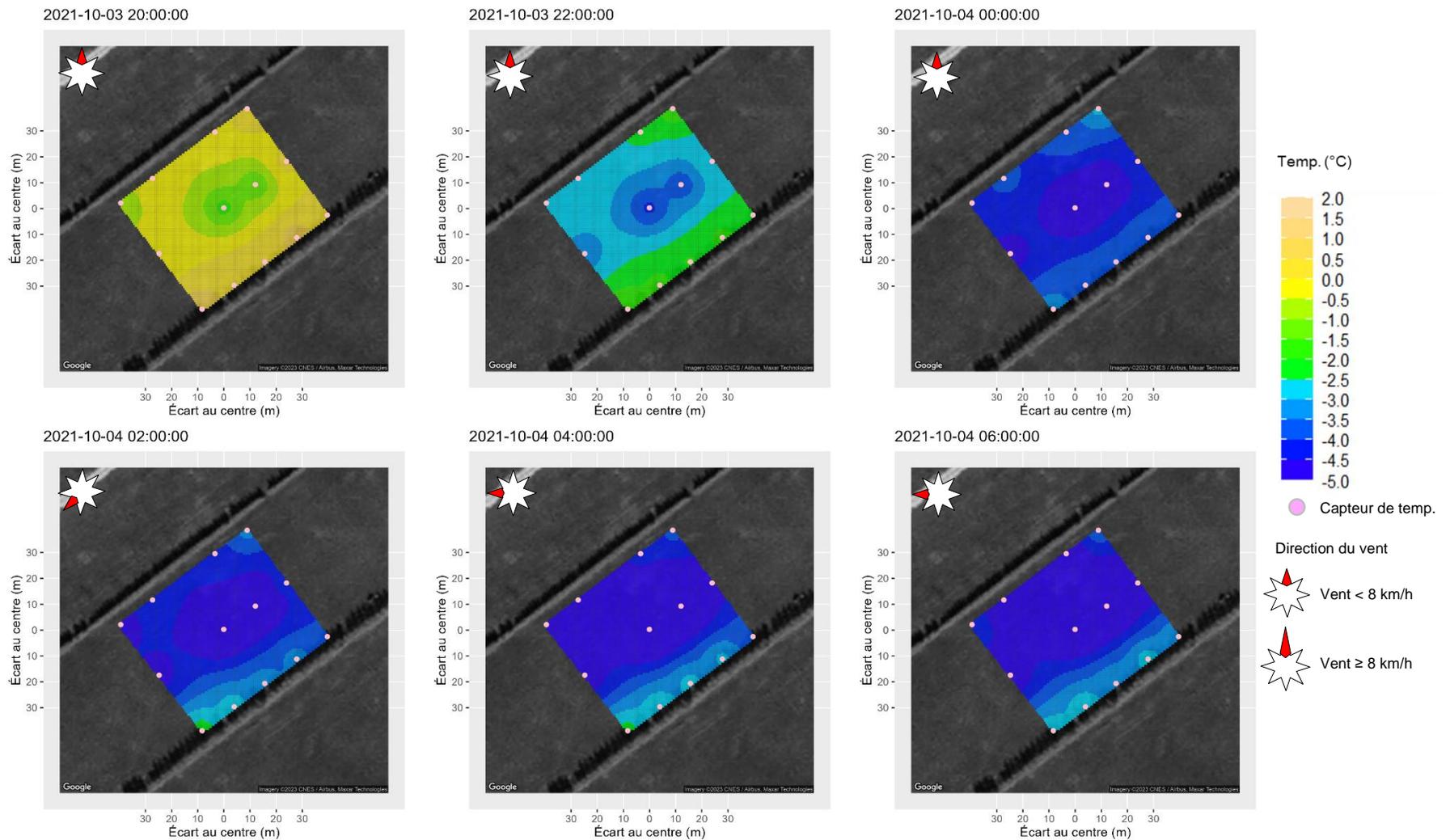


Figure 190. Au site « brise-vent » la nuit du 3 au 4 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

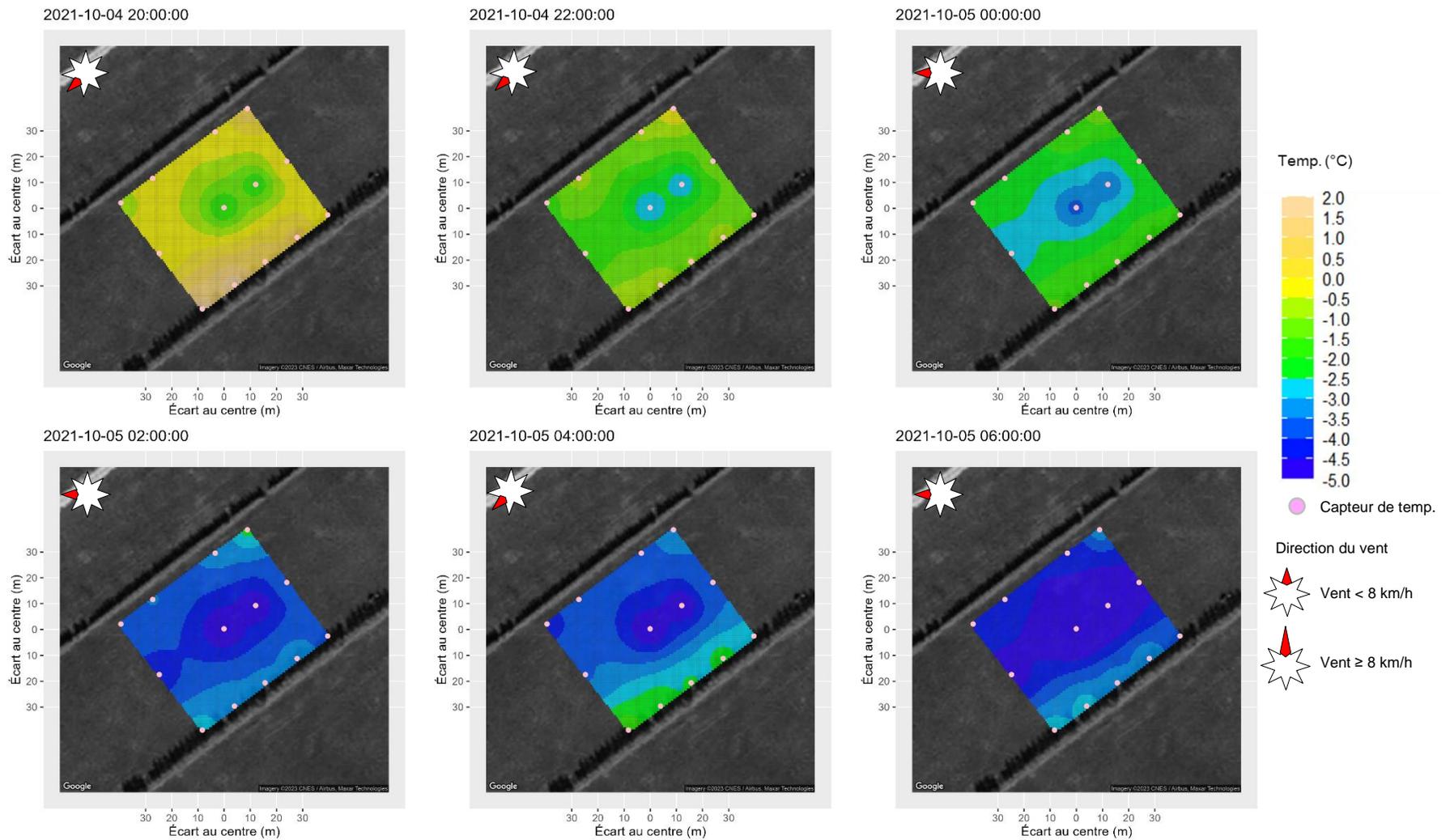


Figure 191. Au site « brise-vent » la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

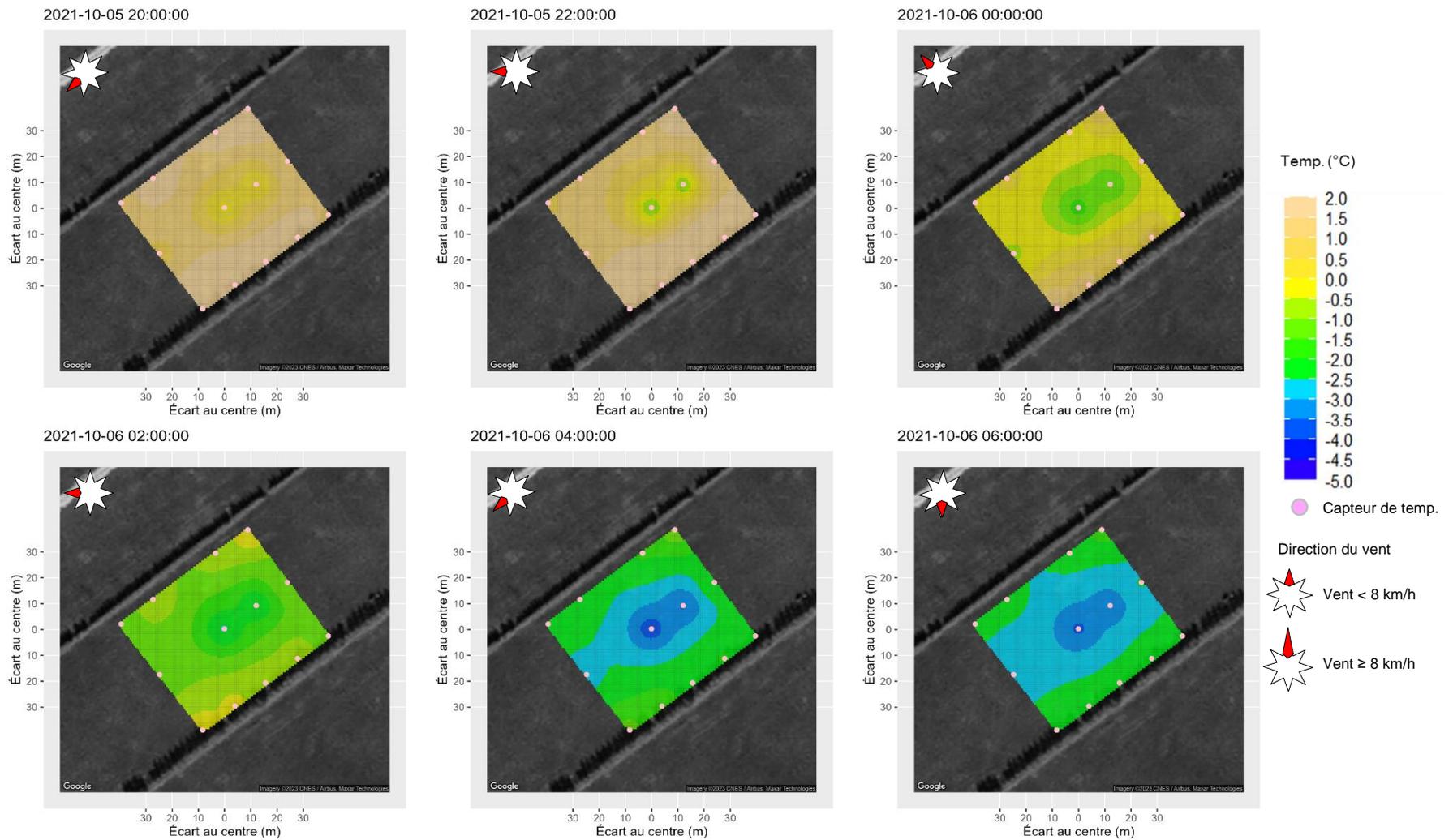


Figure 192. Au site « brise-vent » la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

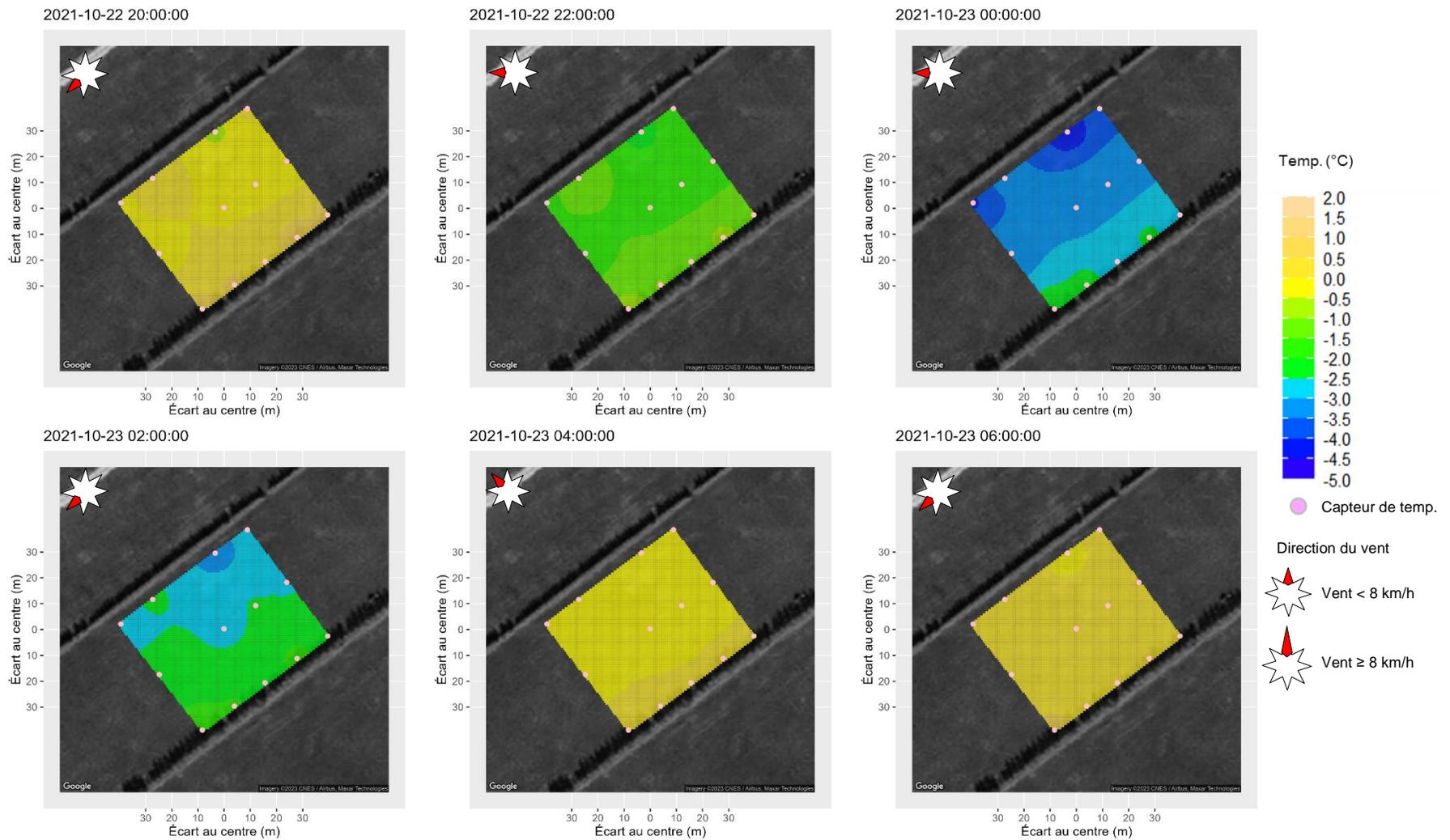


Figure 193. Au site « brise-vent » la nuit du 22 au 23 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



Figure 194. Au site « brise-vent », courbes de niveau du site 2022 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.

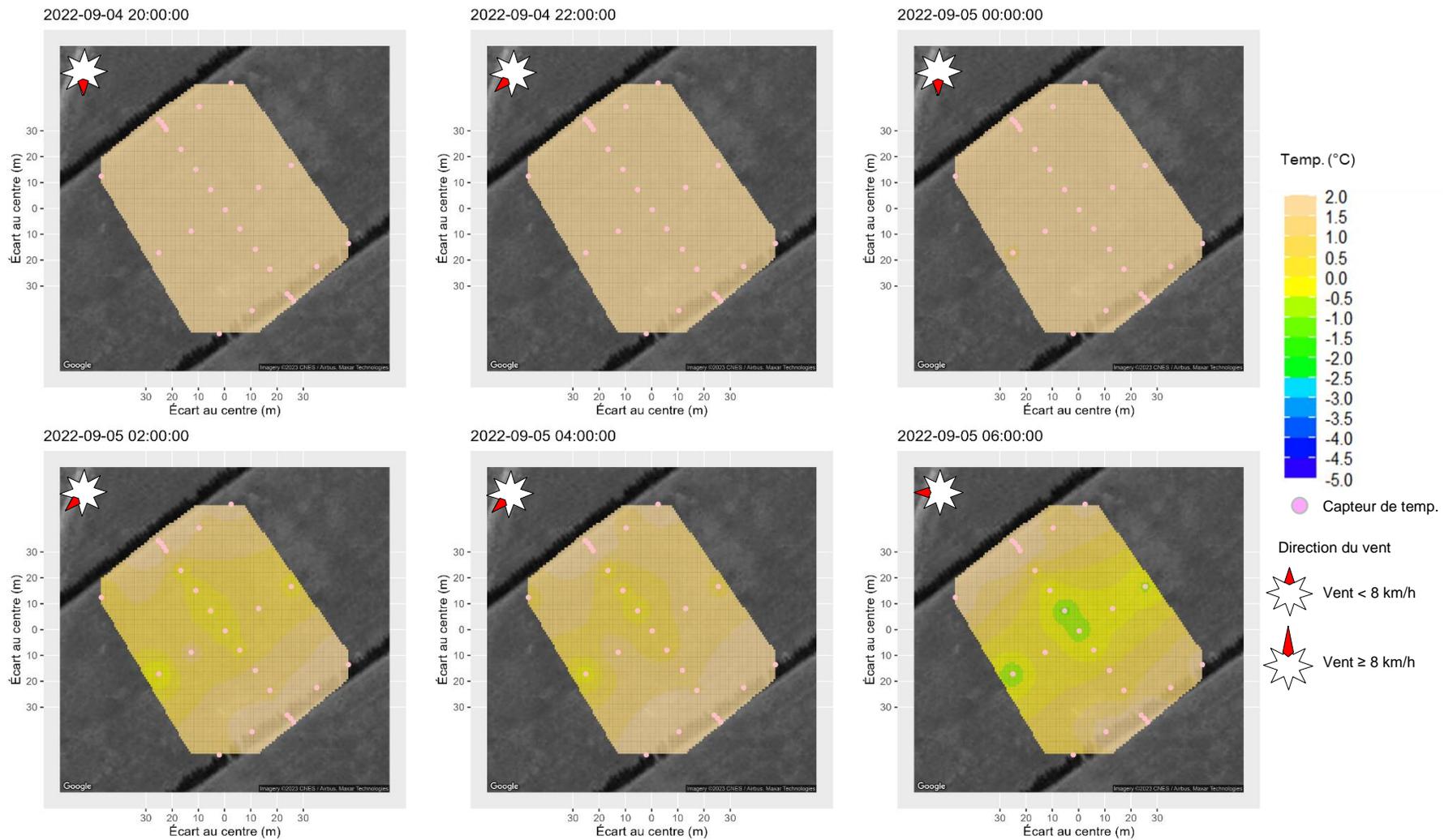


Figure 195. Au site « brise-vent » la nuit du 4 au 5 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

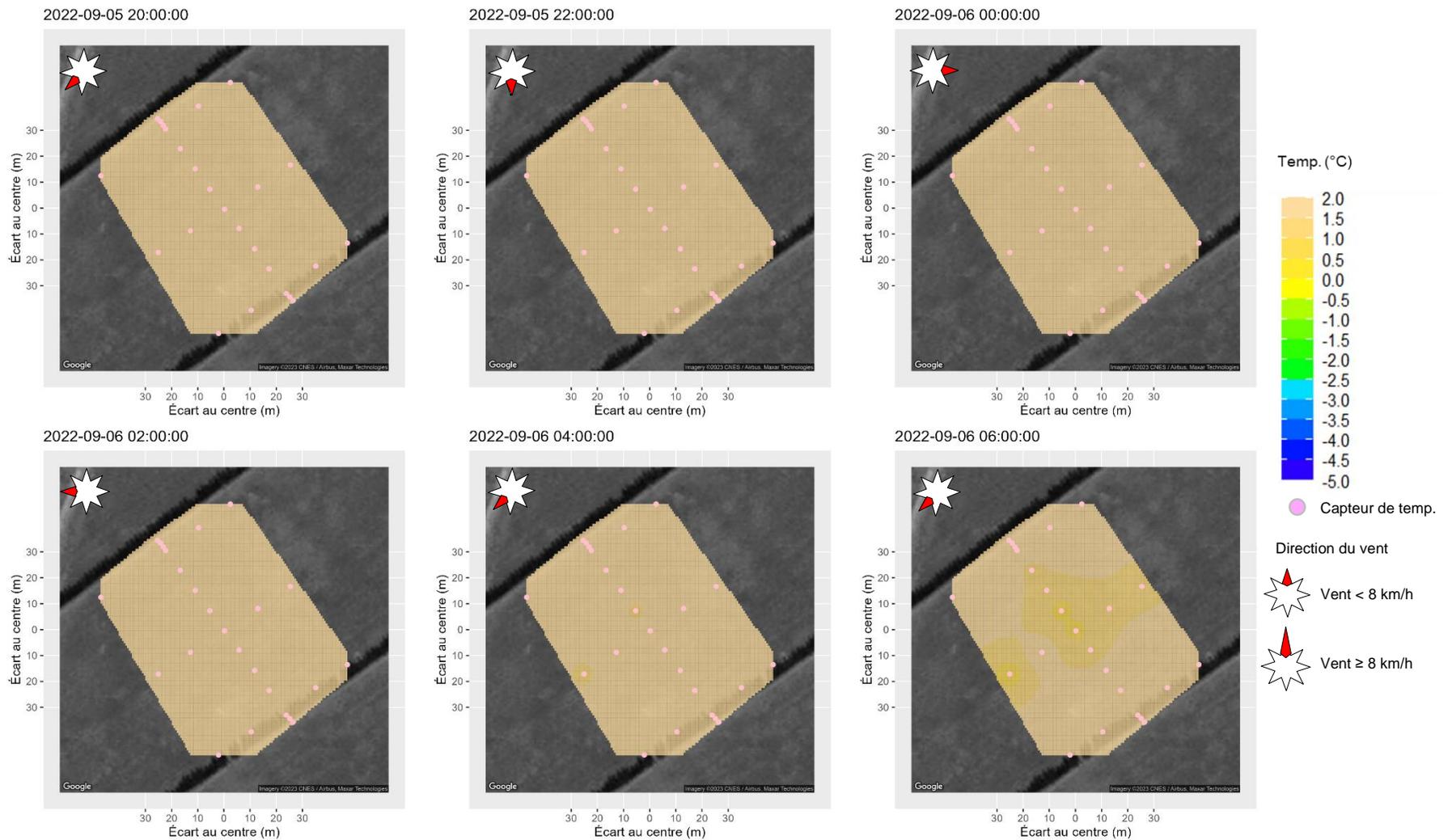


Figure 196. Au site « brise-vent » la nuit du 5 au 6 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

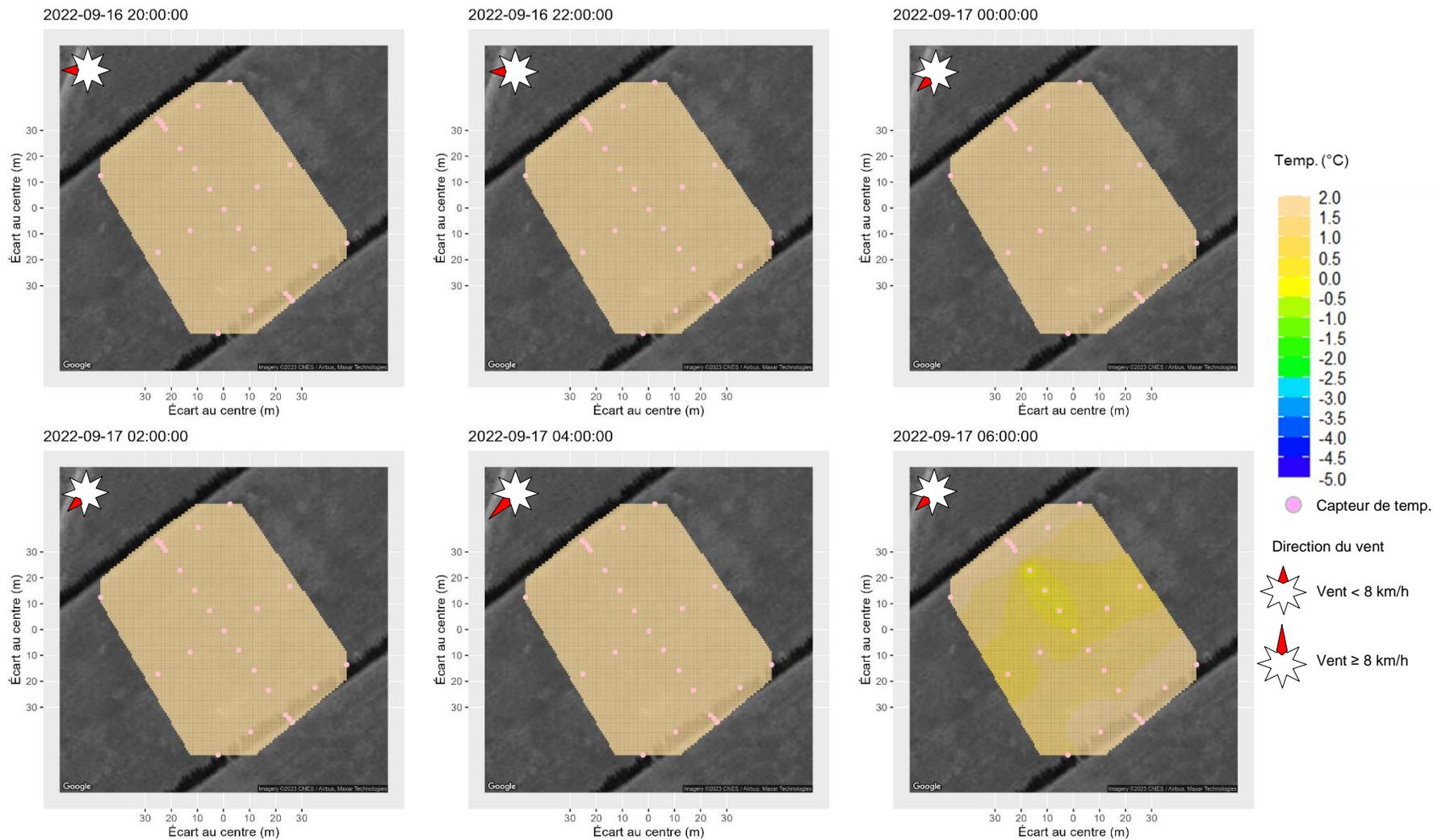


Figure 197. Au site « brise-vent » la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

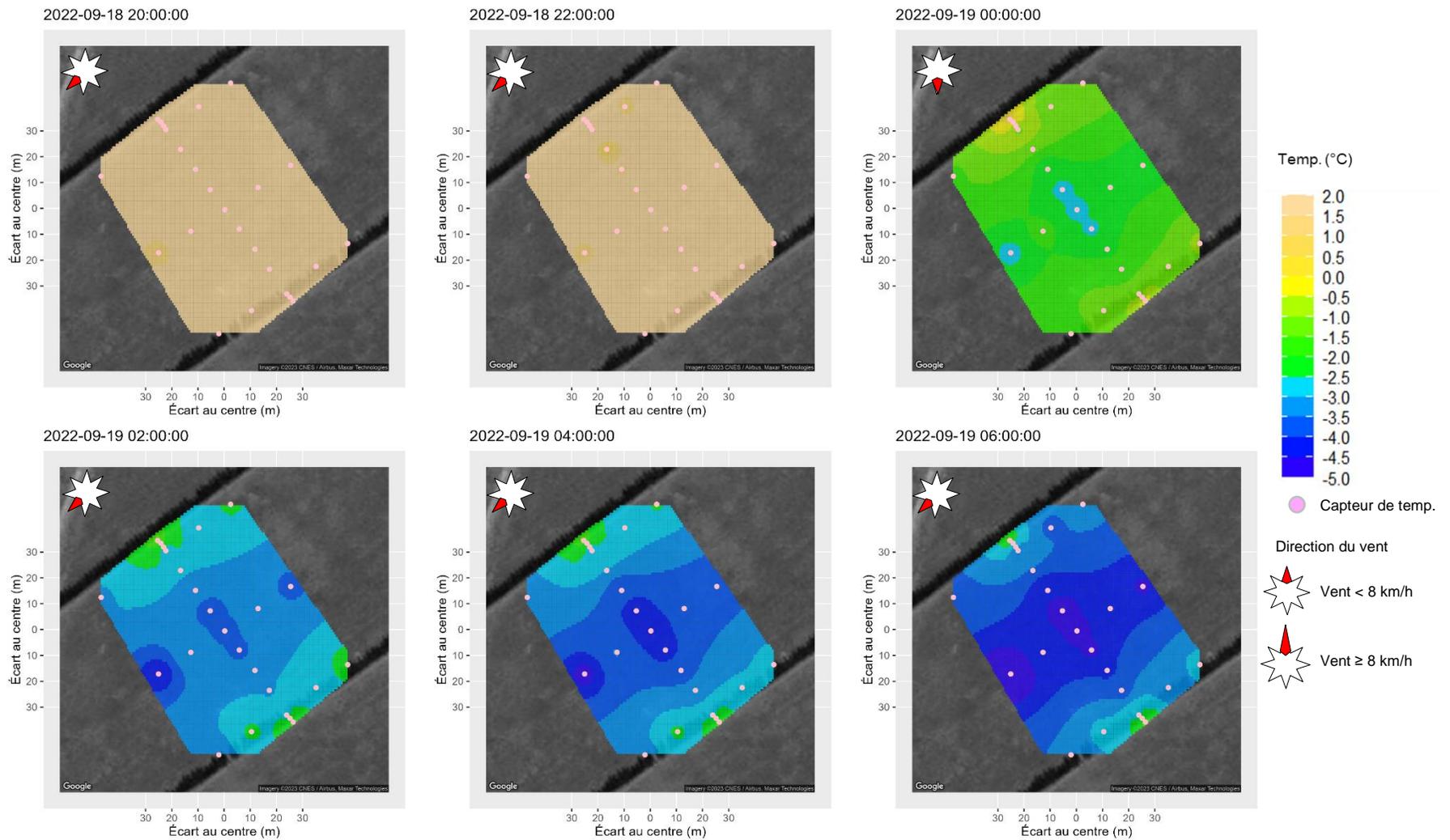


Figure 198. Au site « brise-vent » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

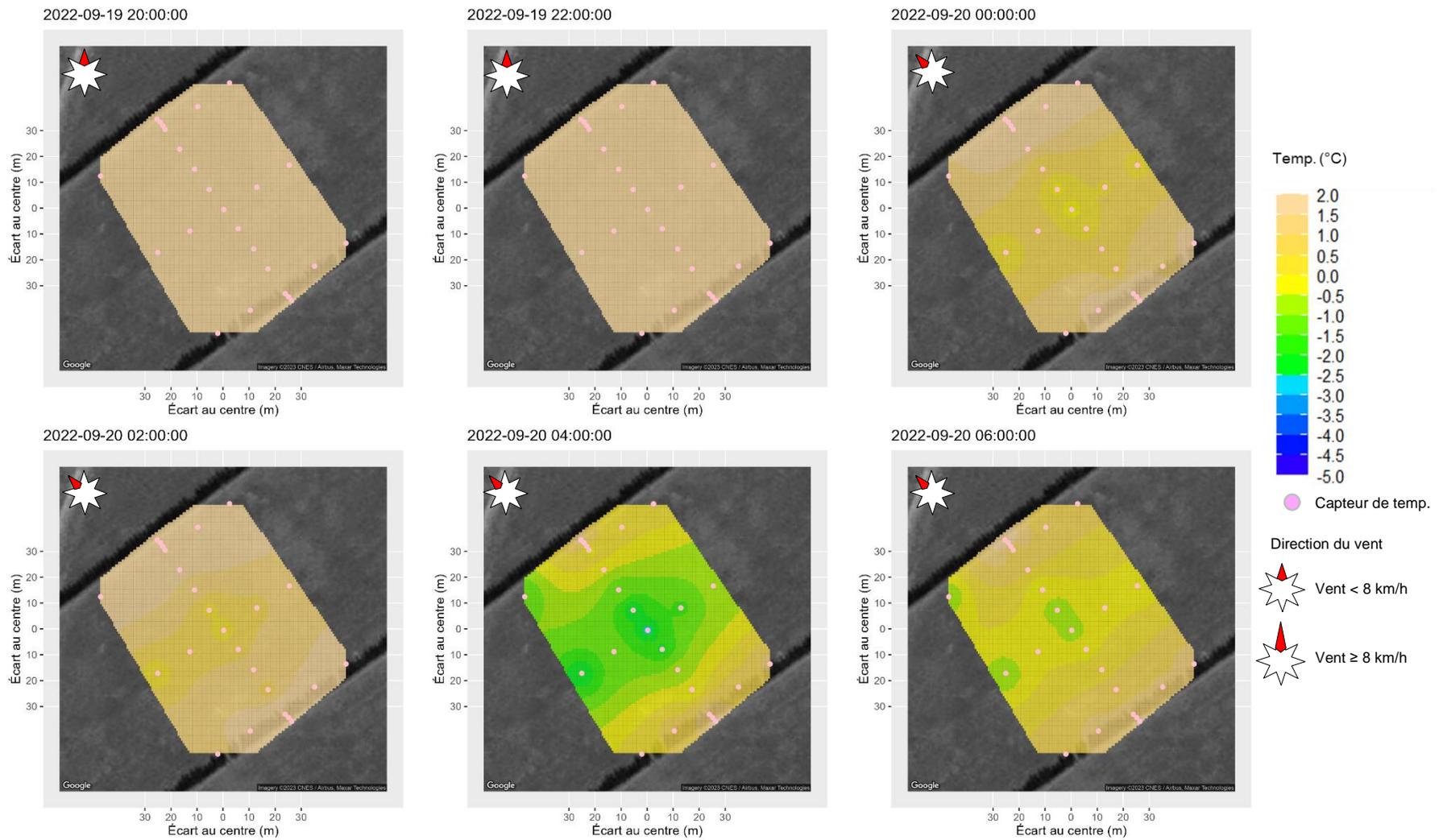


Figure 199. Au site « brise-vent » la nuit du 19 au 20 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

Irrigation du sol sec

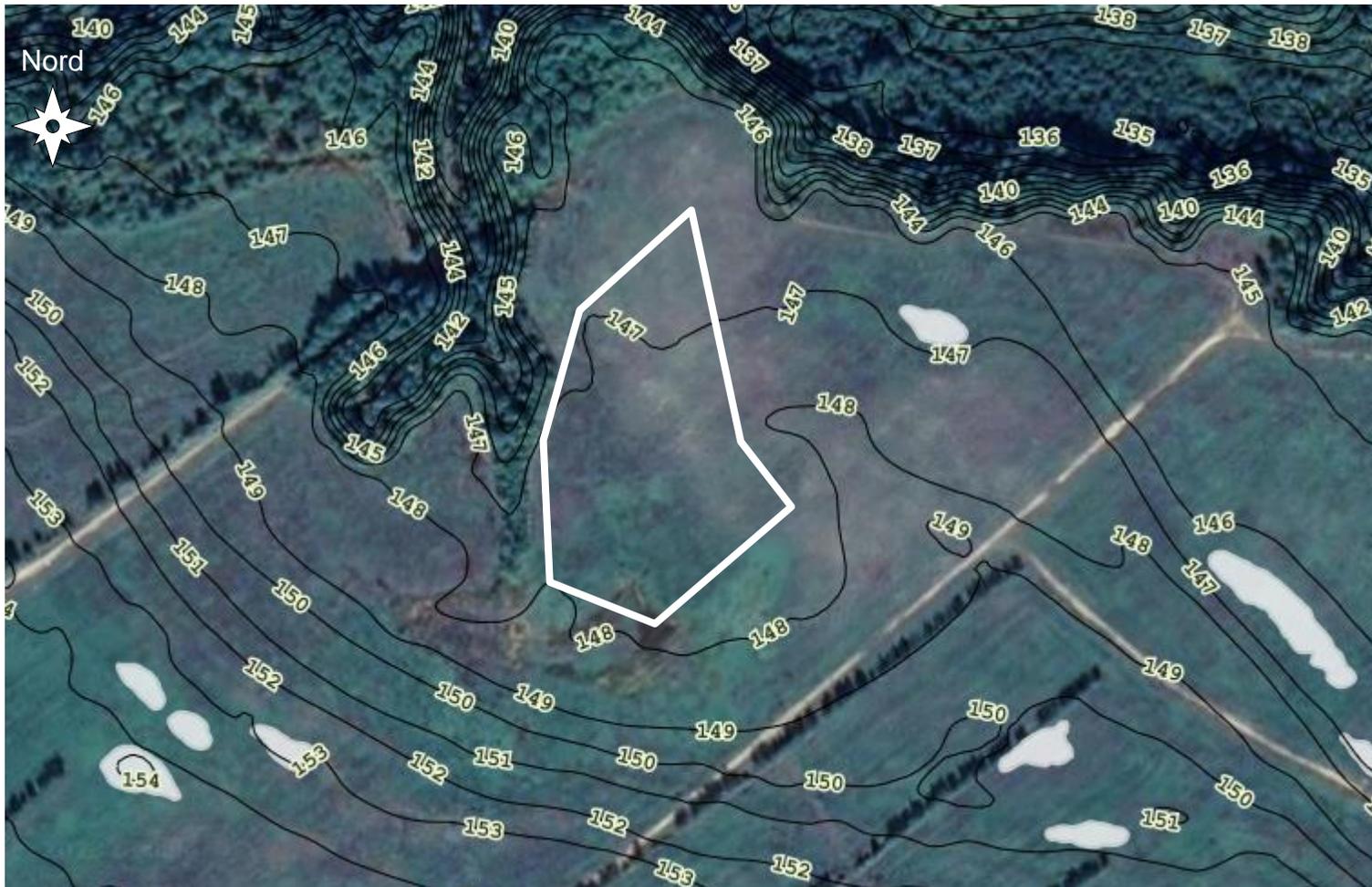


Figure 200. Au site « irrigation du sol sec », courbes de niveau du site 2020 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.

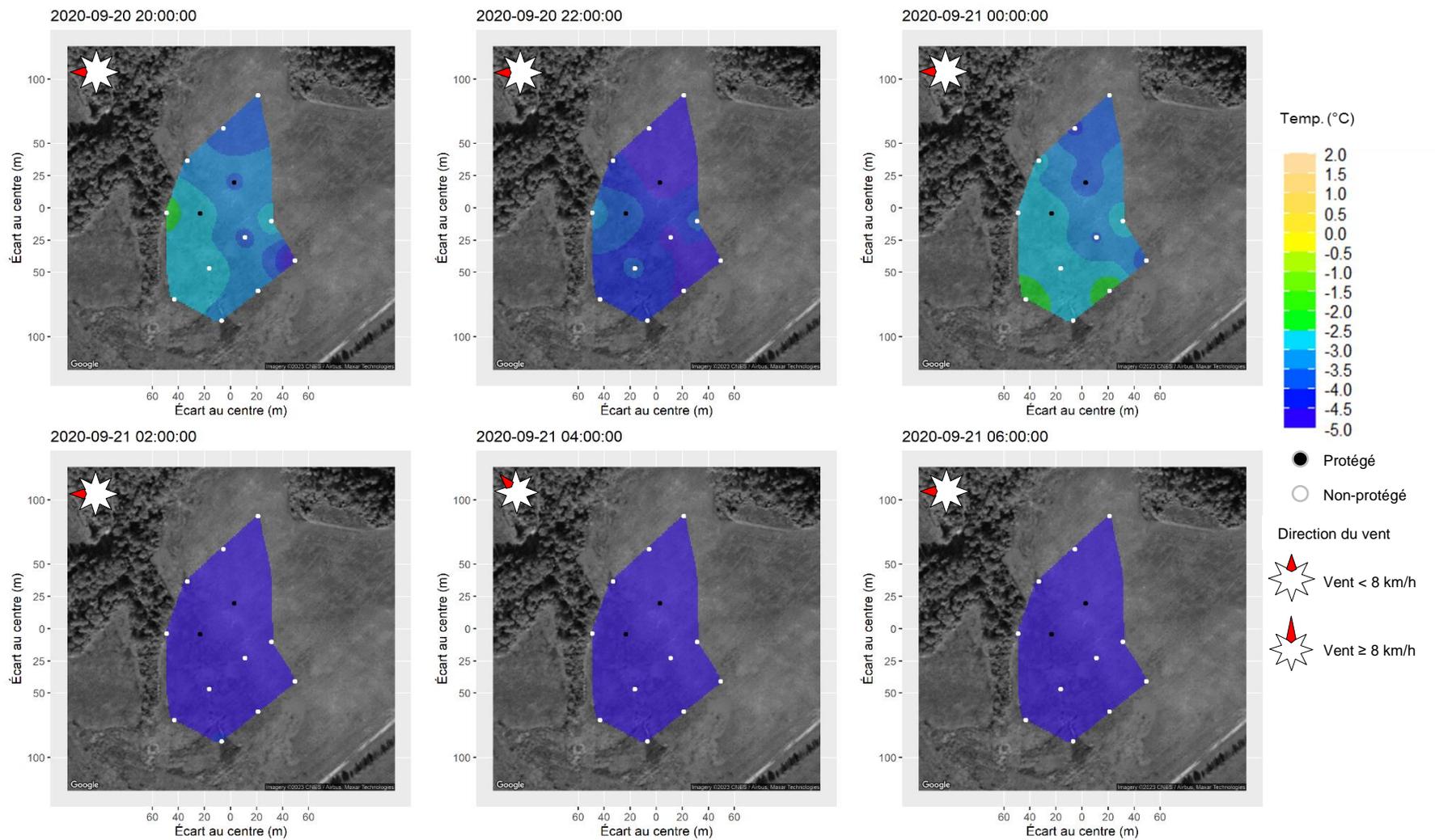
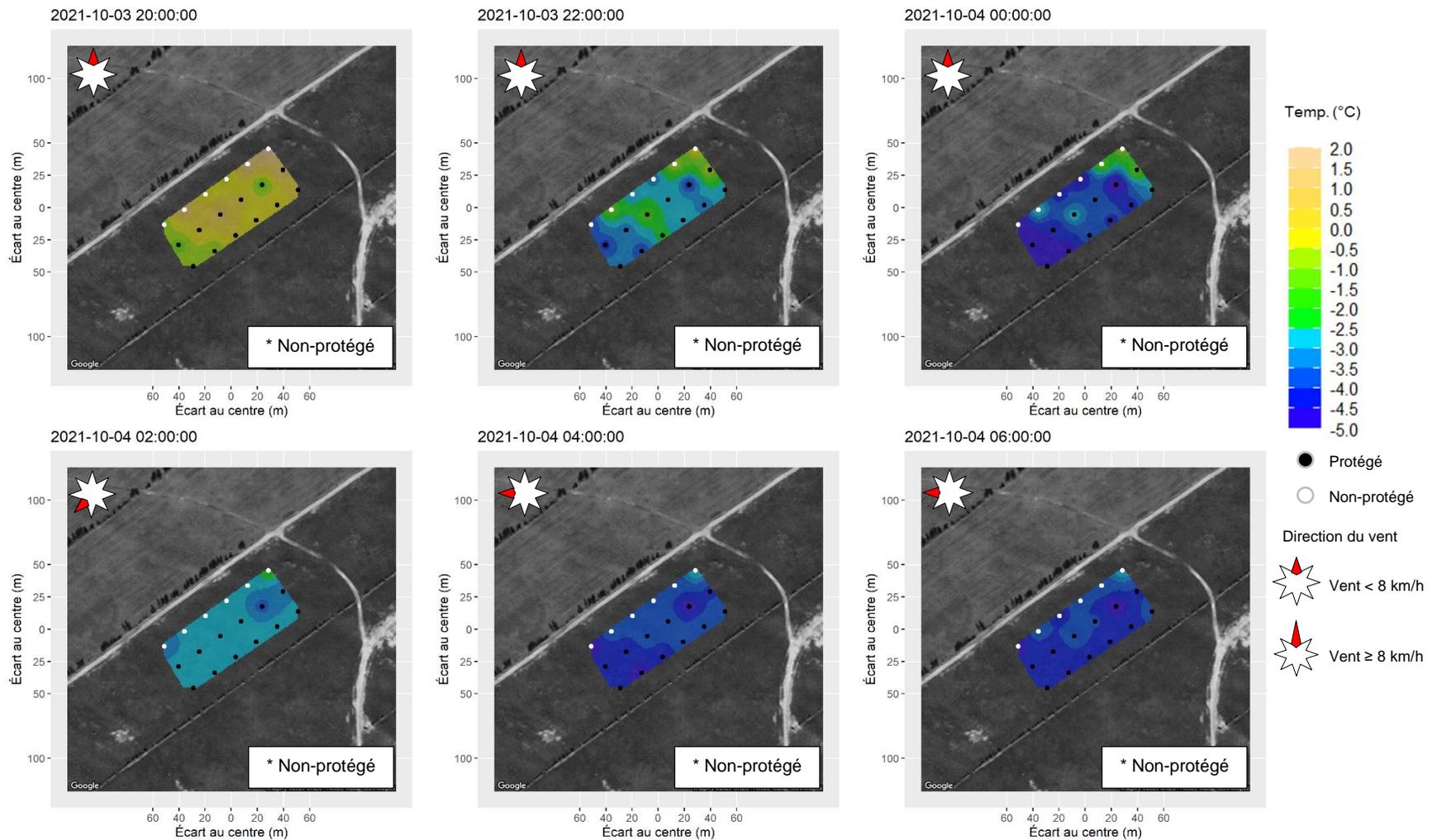


Figure 201. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

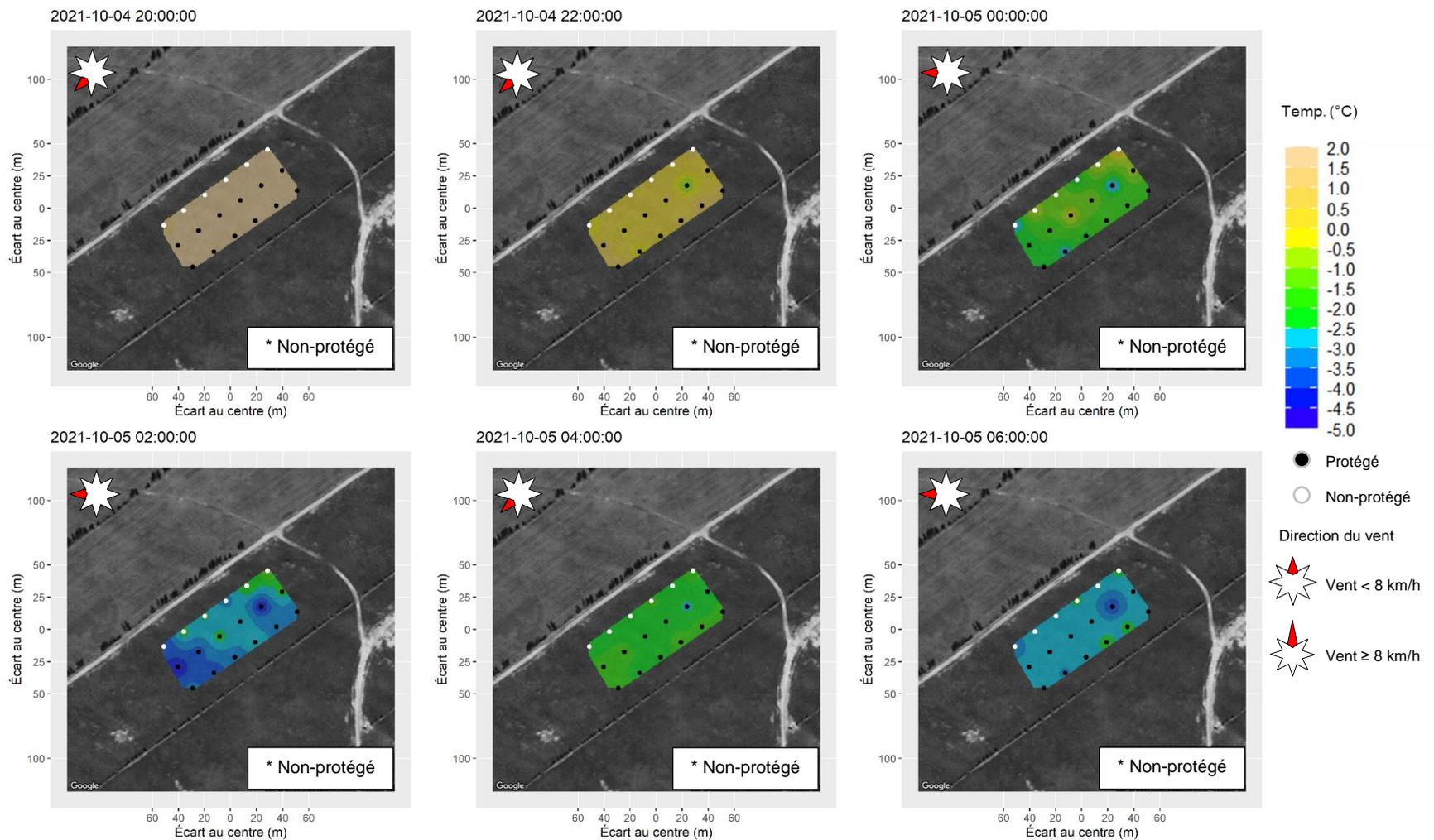


Figure 202. Au site « irrigation du sol sec », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.



*L'irrigation pour ramener le sol à capacité au champ n'a pas encore eu lieu à cette date.

Figure 203. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 3 au 4 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



*L'irrigation pour ramener le sol à capacité au champ n'a pas encore eu lieu à cette date.

Figure 204. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

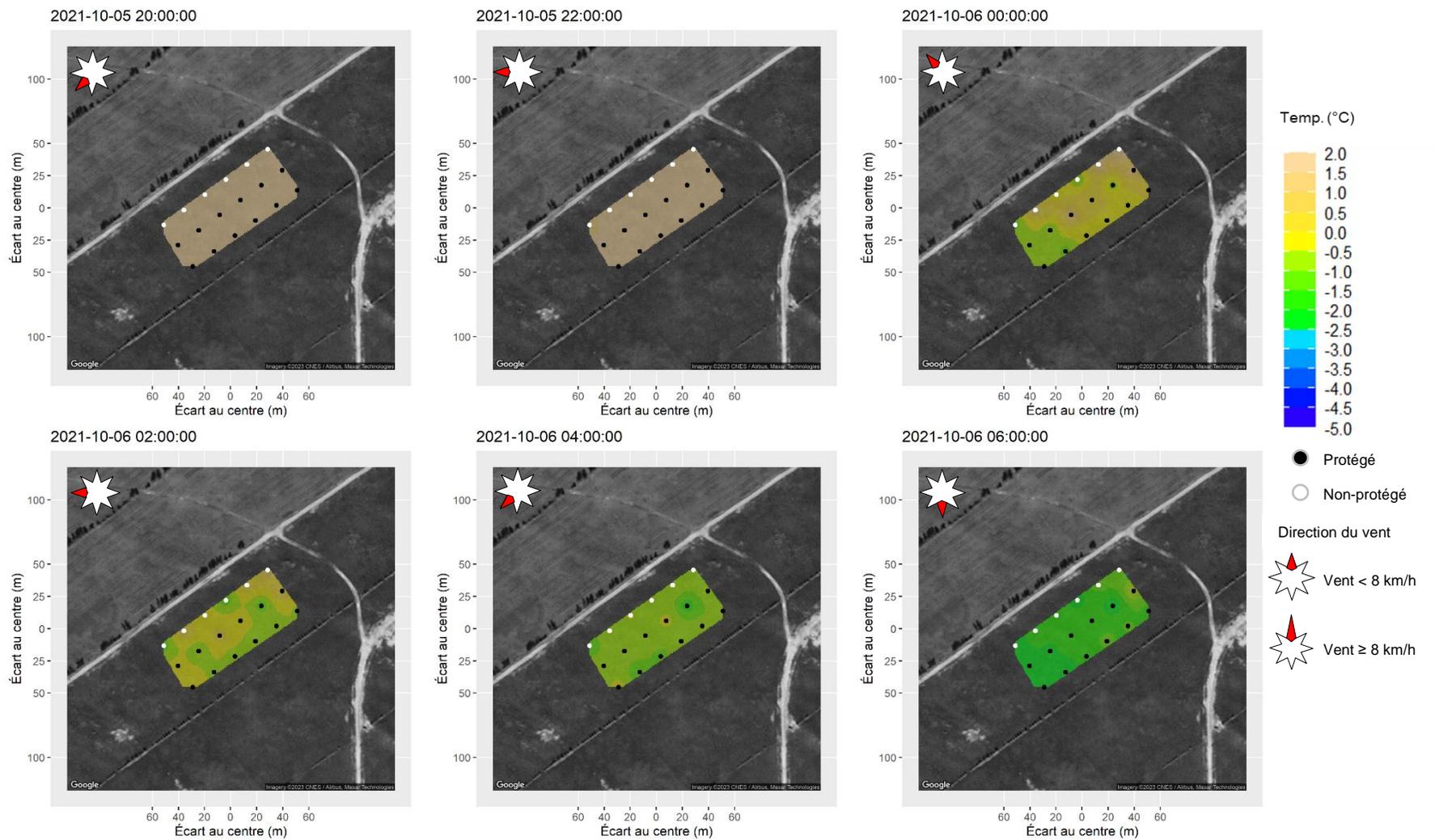


Figure 205. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.

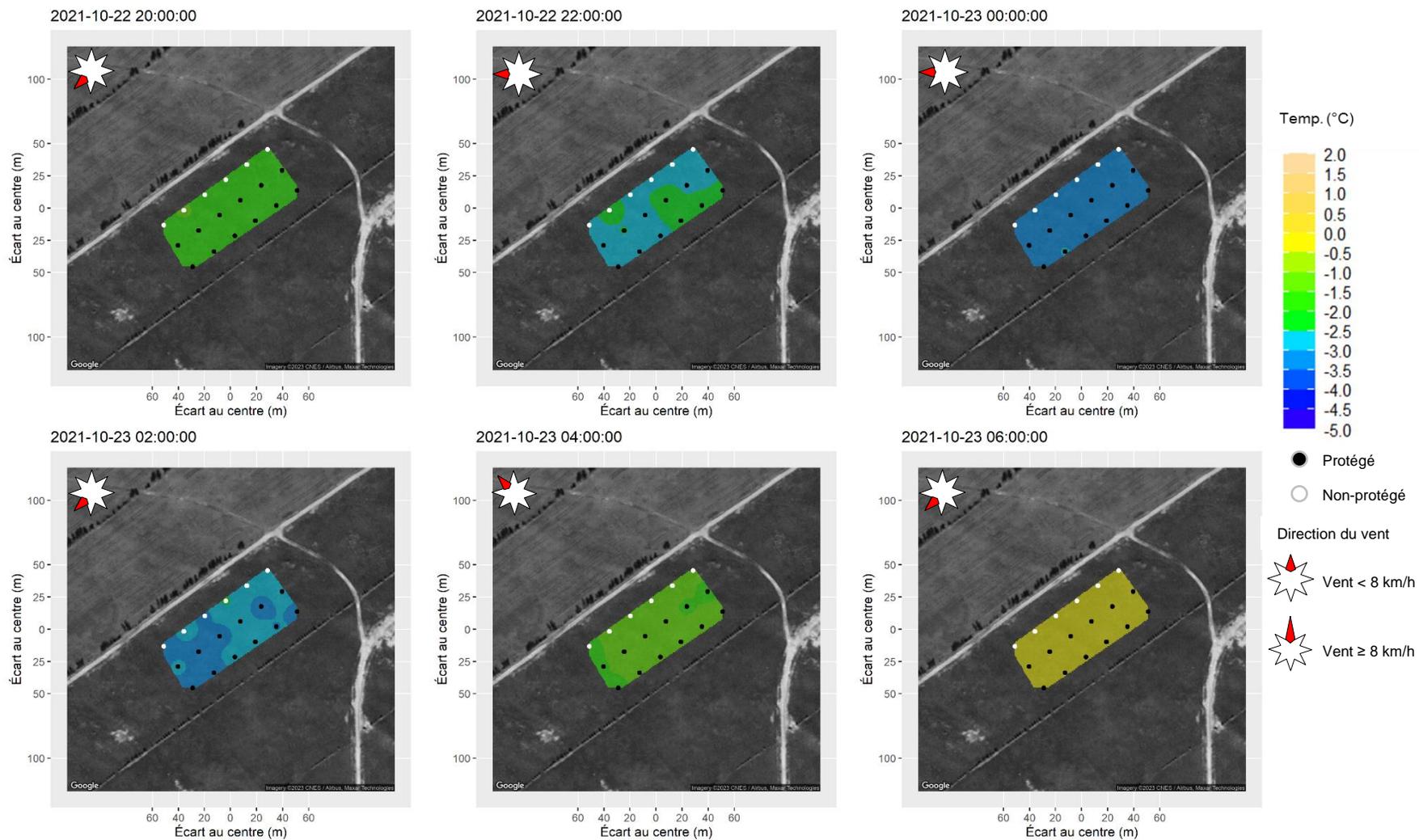


Figure 206. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 22 au 23 octobre 2021, cartes d’interpolation spatiales des températures (°C) de l’air à la hauteur des fruits.



Figure 207. Au site « irrigation du sol sec », courbes de niveau du site 2022 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.

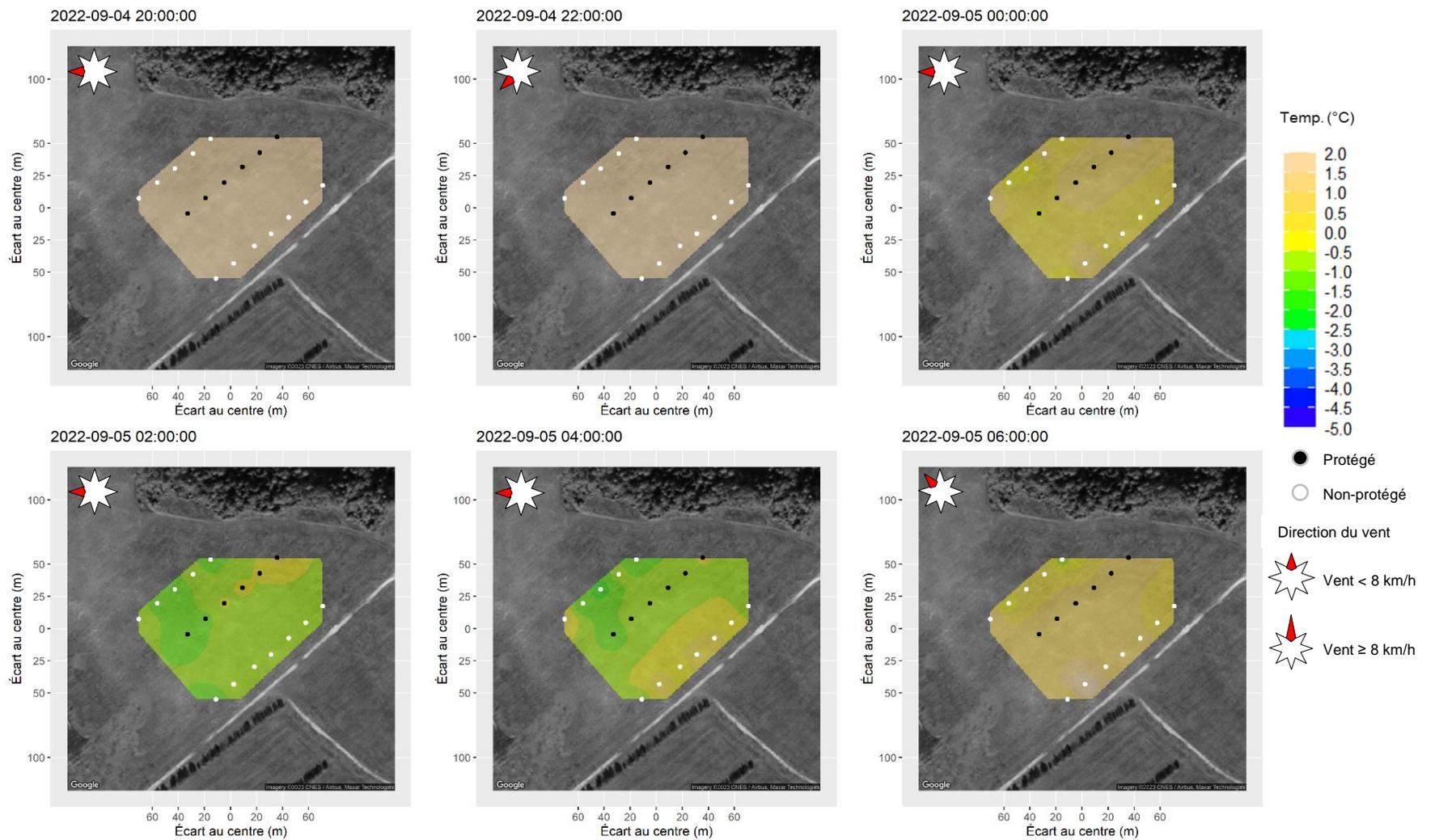


Figure 208. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 4 au 5 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

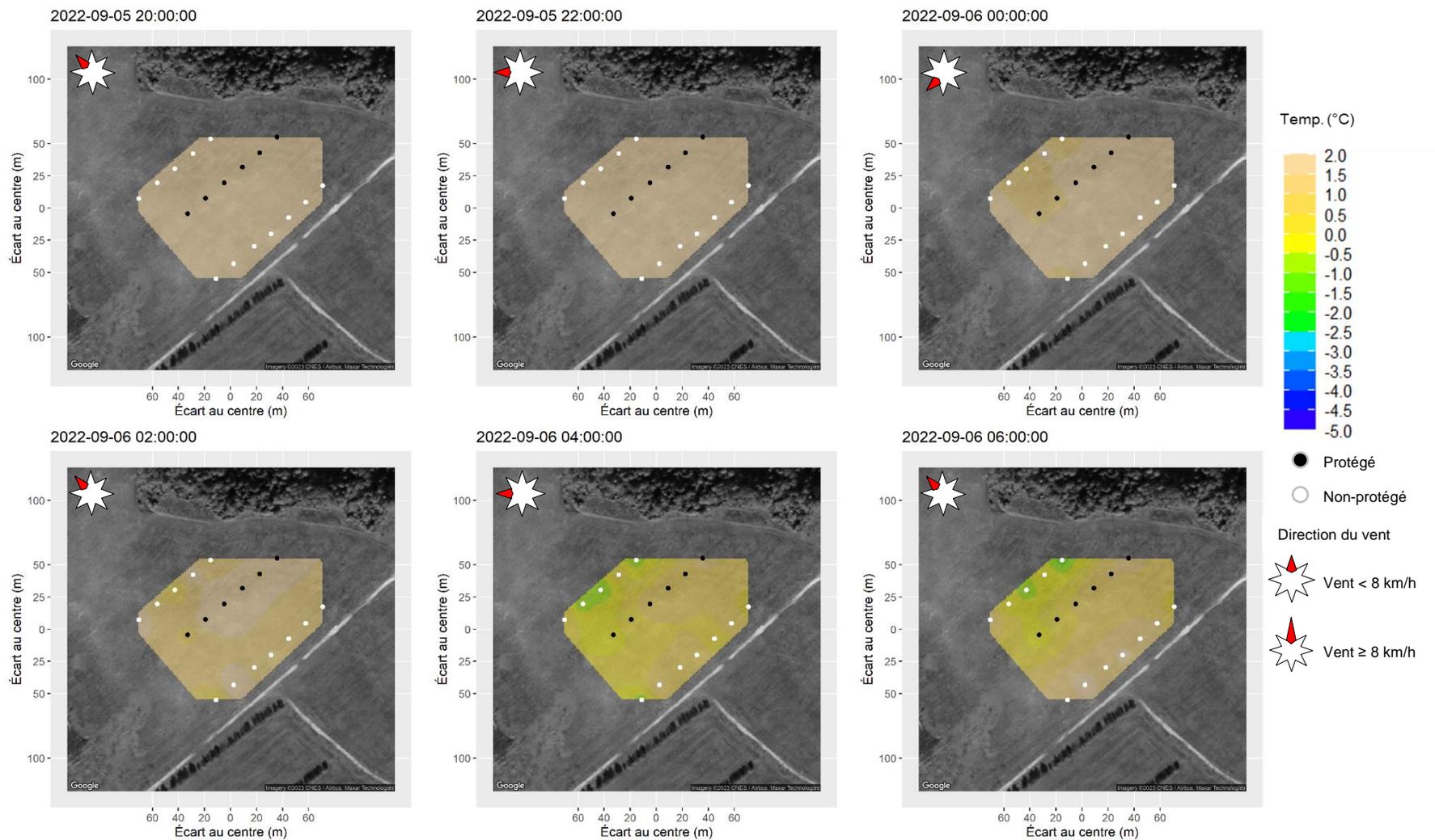


Figure 209. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 5 au 6 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

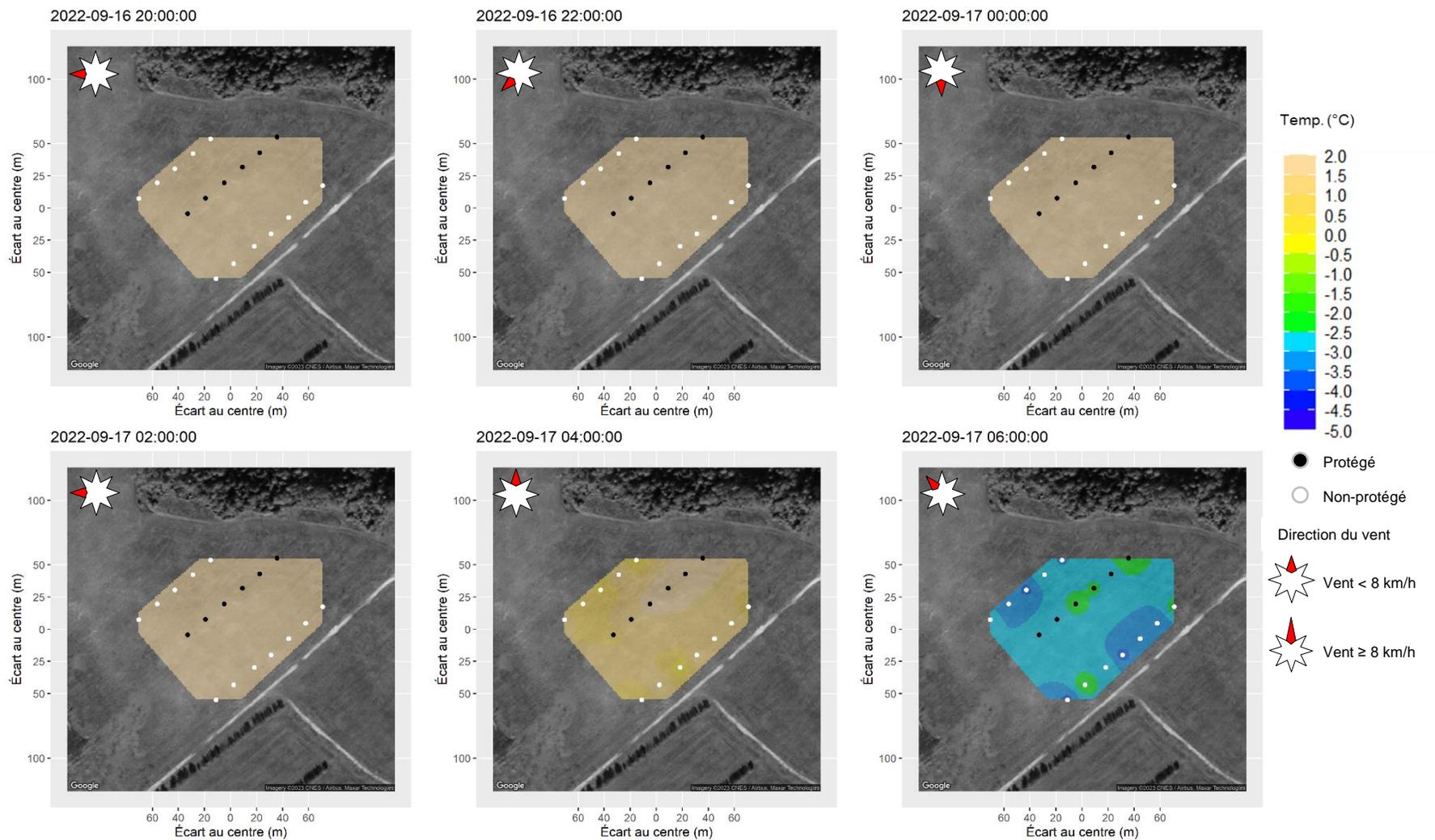


Figure 210. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

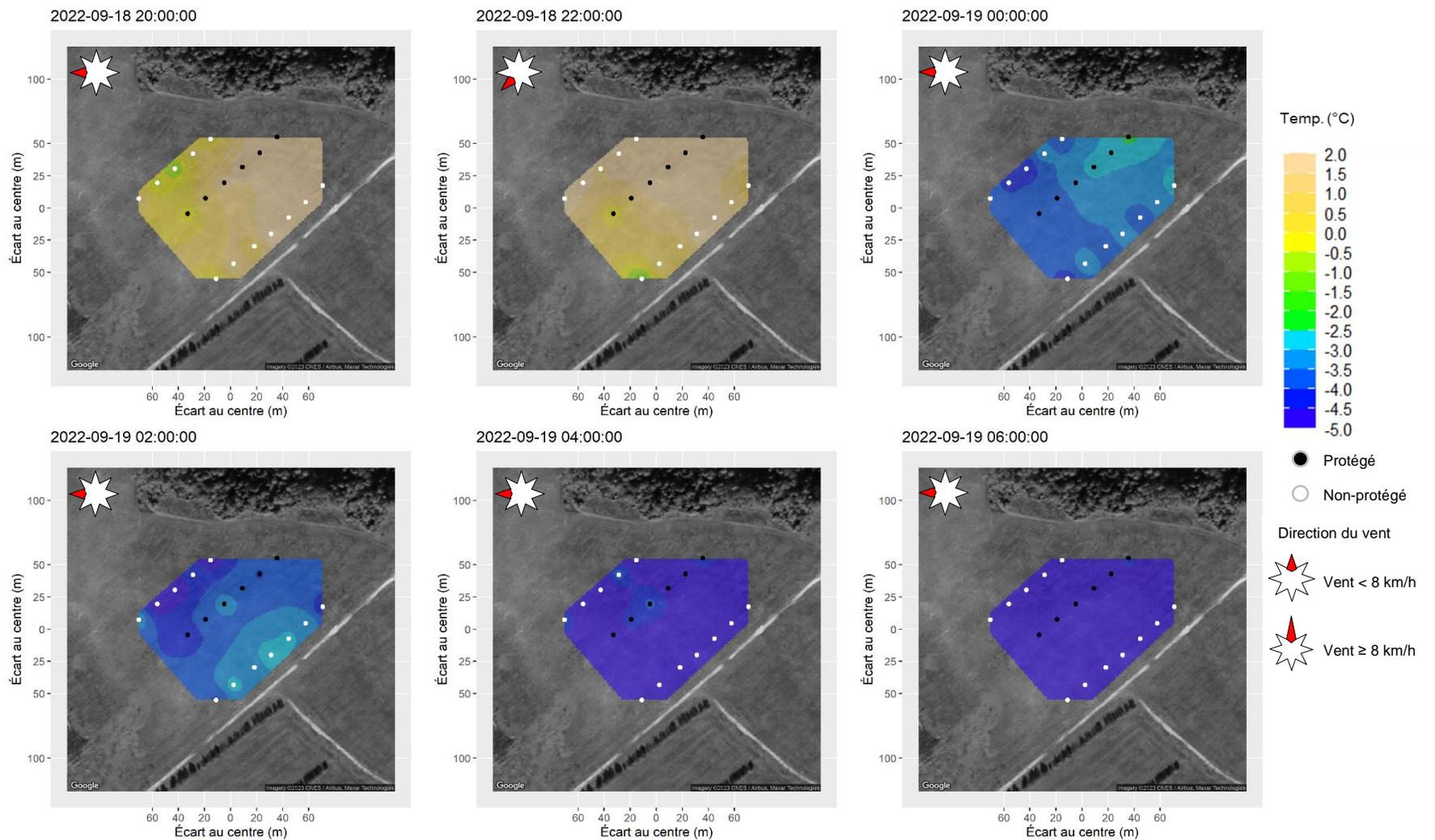


Figure 211. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

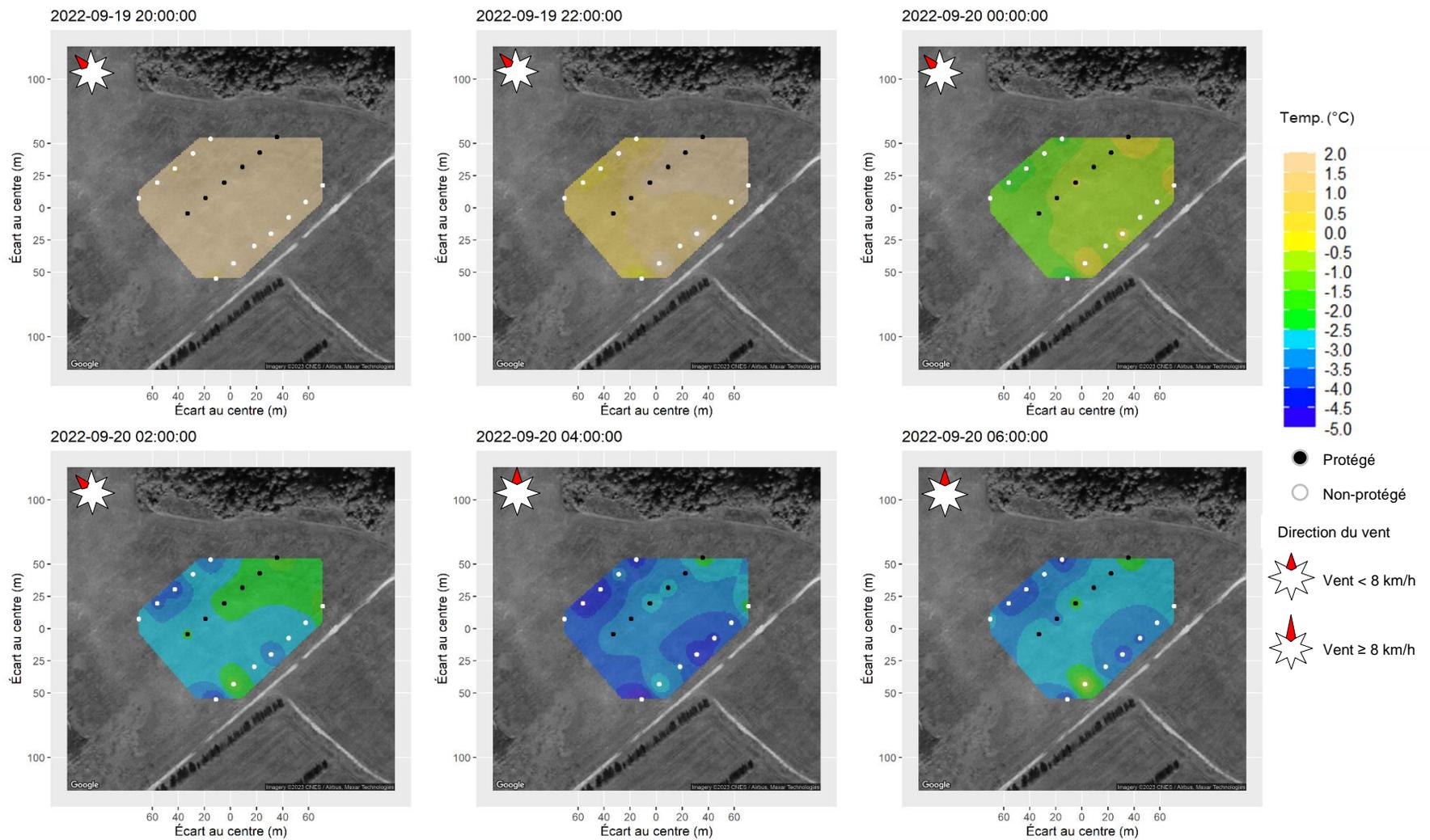
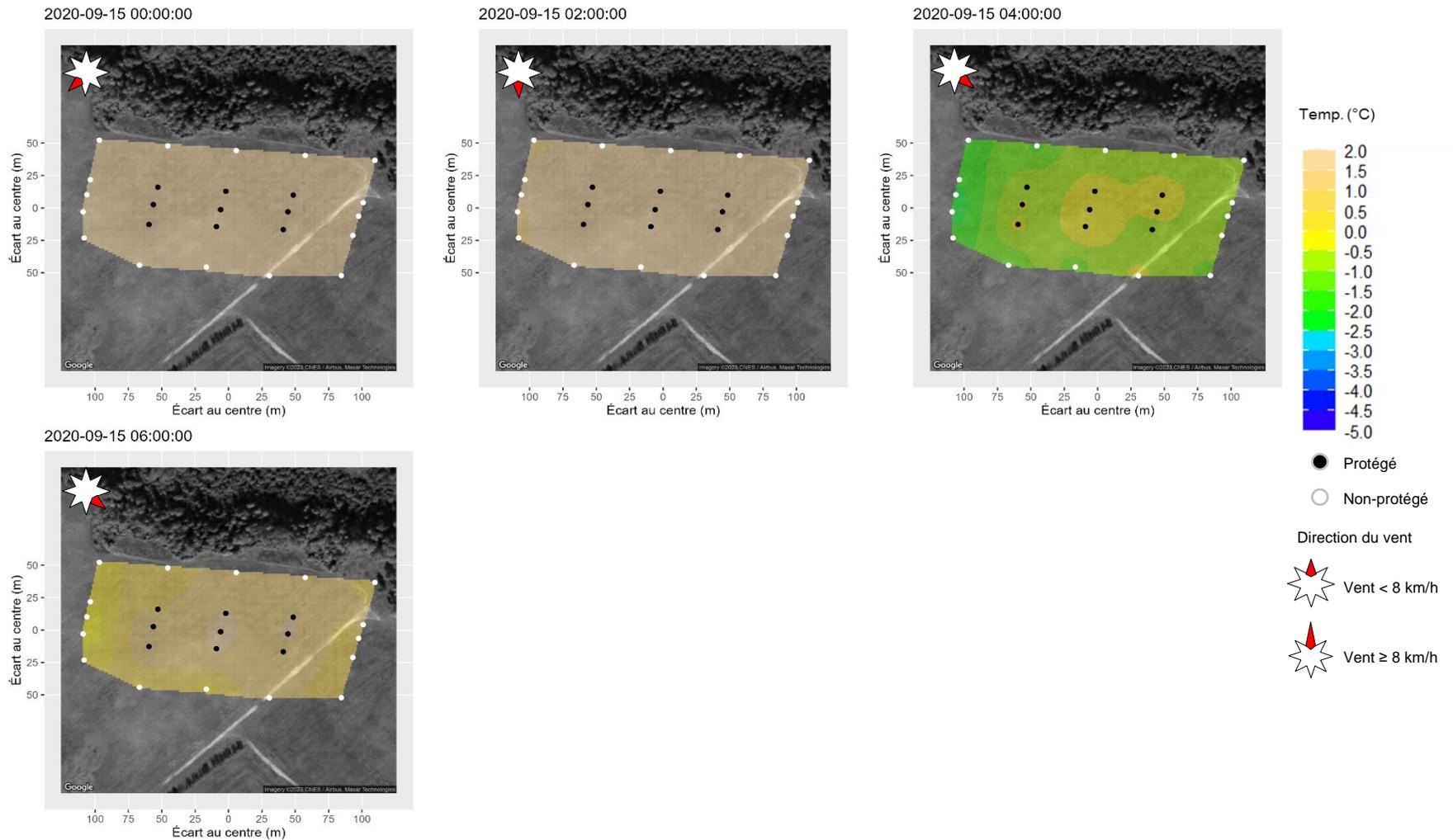


Figure 212. Au site « irrigation du sol sec », la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

Irrigation durant le gel

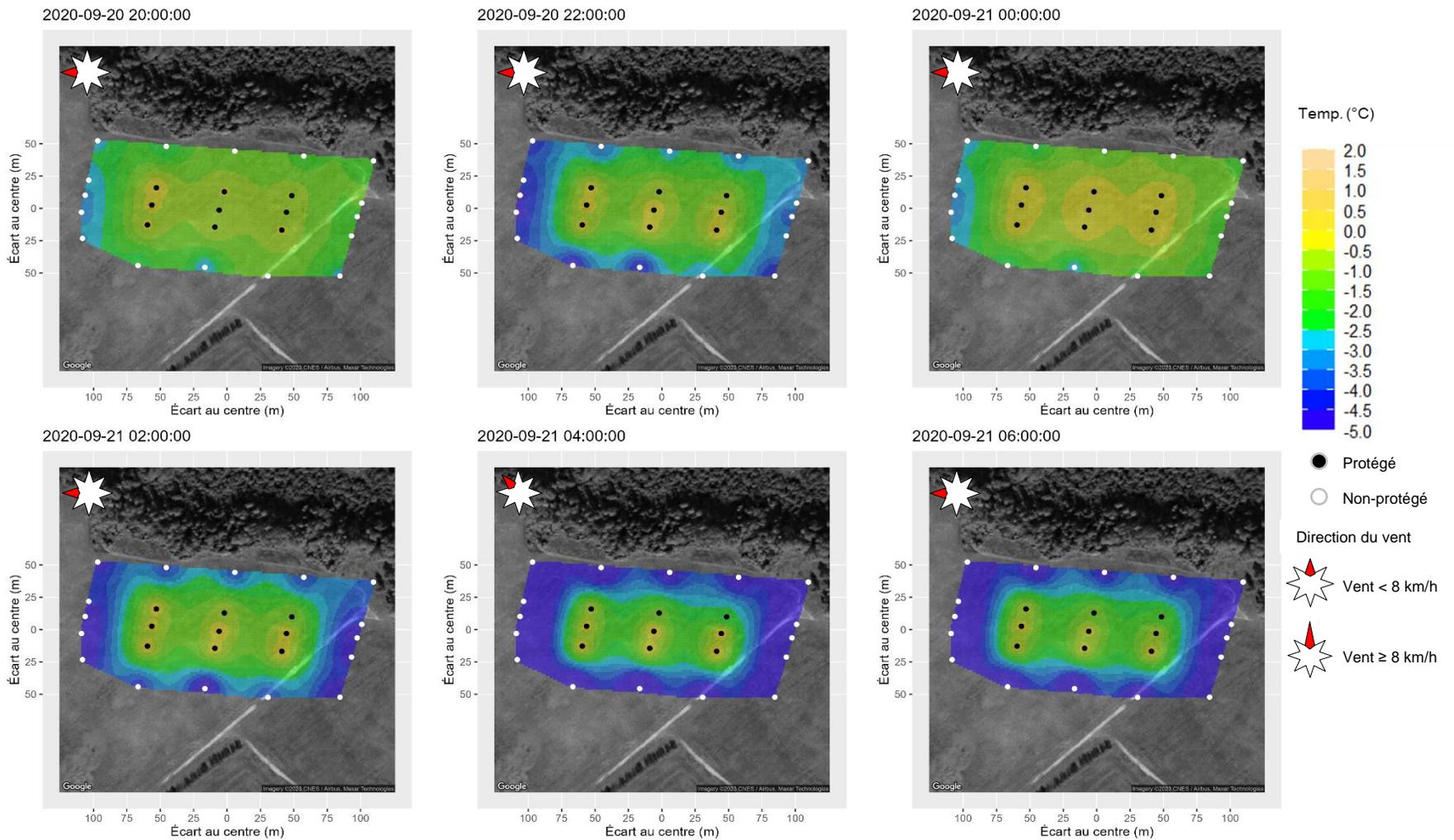


Figure 213. Au site « irrigation », courbes de niveau du site 2020 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.



* Déclenchement de l'irrigation à 22 h 10.

Figure 214. Au site « irrigation » la nuit du 14 au 15 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

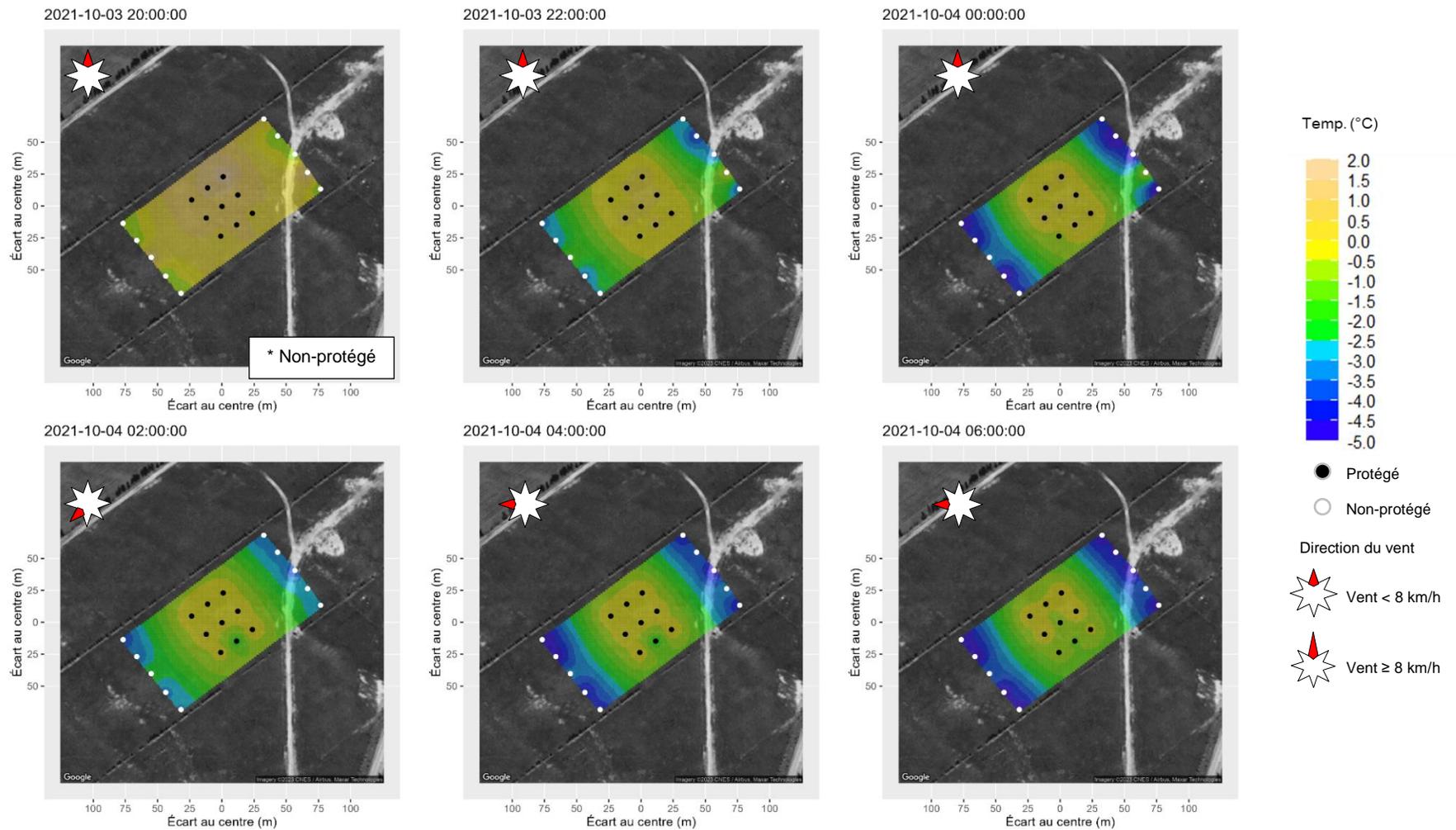


* Déclenchement de l'irrigation à 17 h 15.

Figure 215. Au site « irrigation » la nuit du 20 au 21 septembre 2020, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

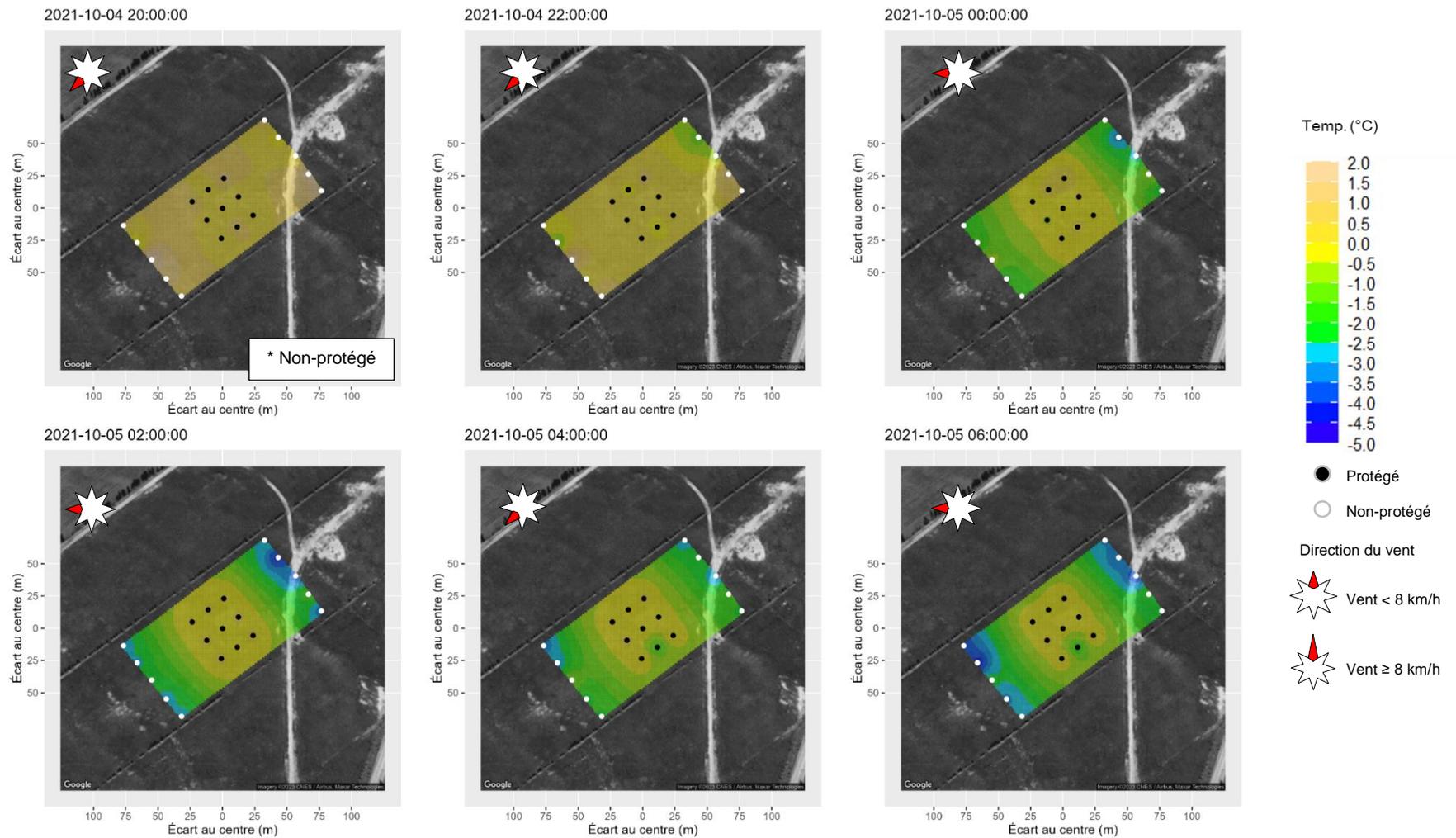


Figure 216. Au site « irrigation », courbes de niveau du site 2021 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.



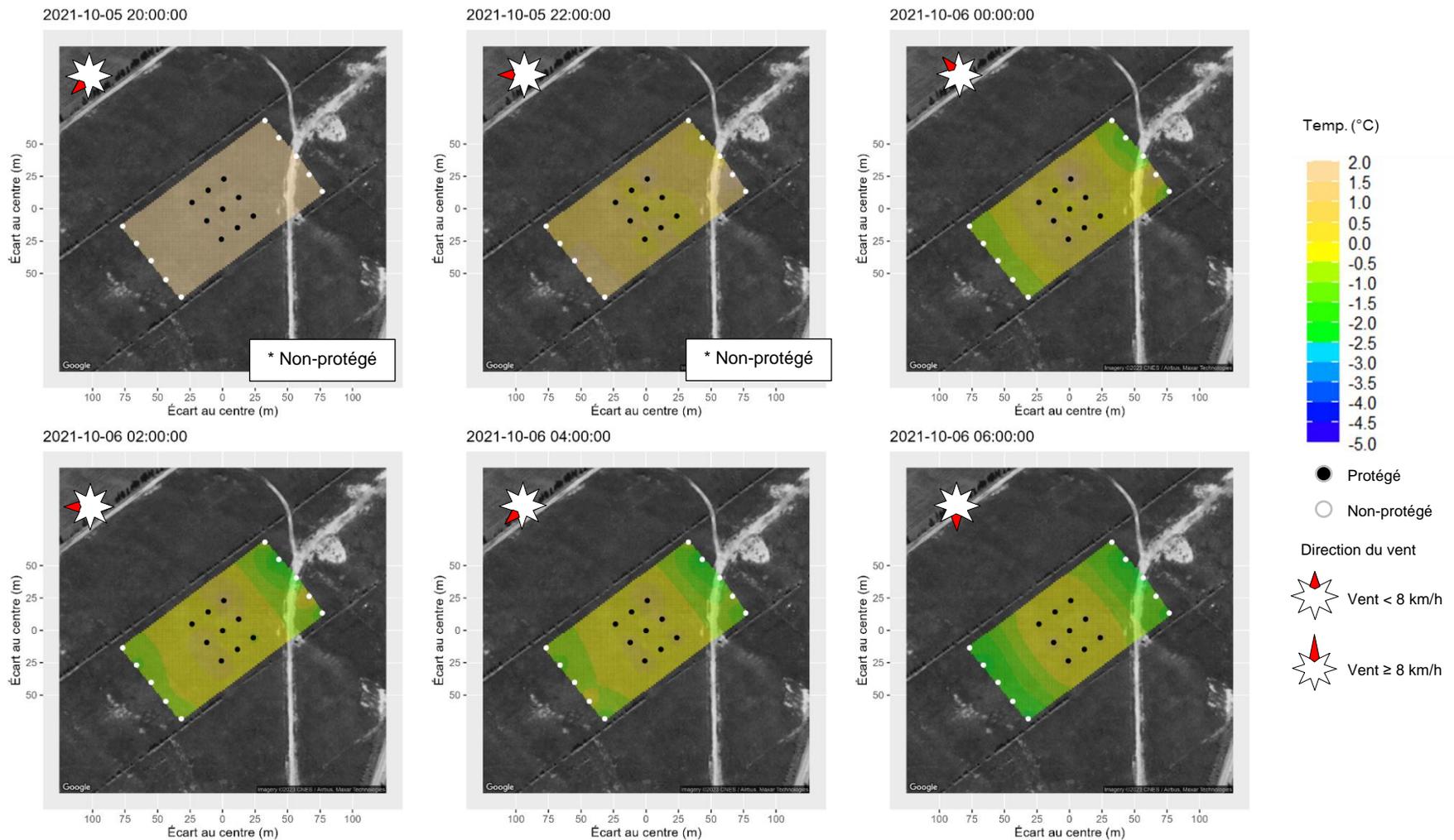
* Déclenchement de l'irrigation à 20 h 15.

Figure 217. Au site « irrigation » la nuit du 3 au 4 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



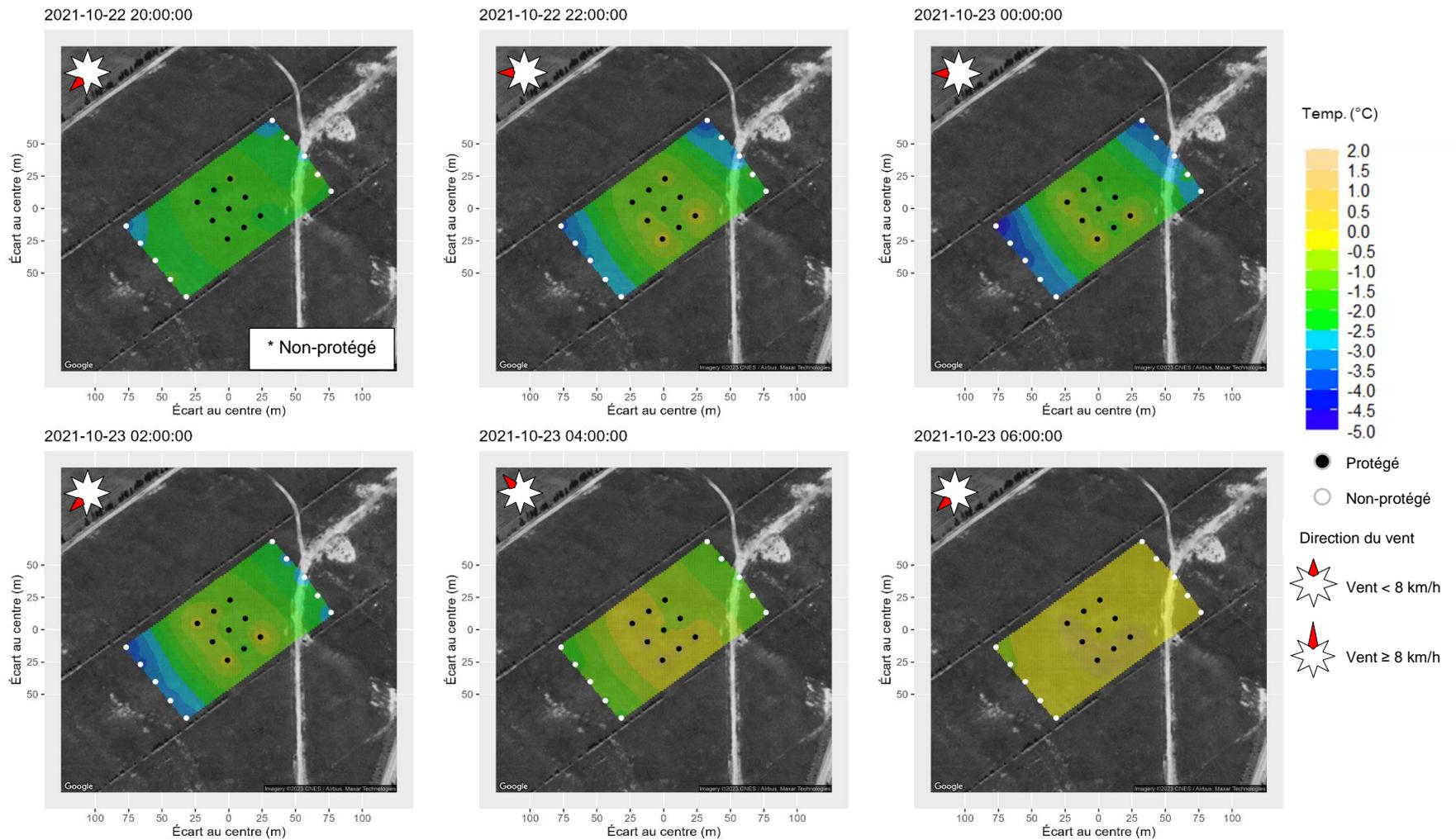
* Déclenchement de l'irrigation à 21 h 50.

Figure 218. Au site « irrigation » la nuit du 4 au 5 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



* Déclenchement de l'irrigation à 22 h 25.

Figure 219. Au site « irrigation » la nuit du 5 au 6 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

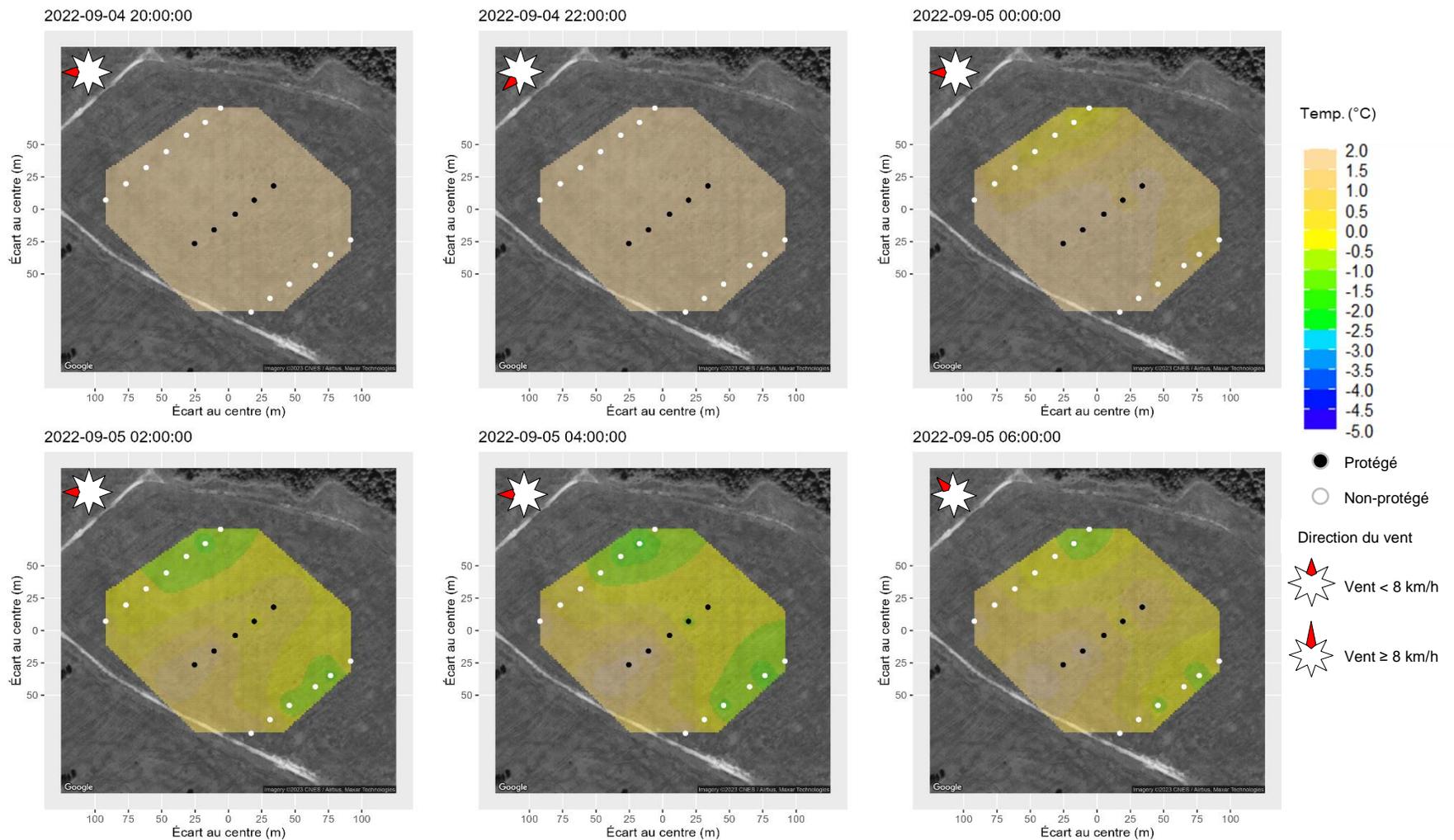


* Déclenchement de l'irrigation à 21 h 15.

Figure 220. Au site « irrigation » la nuit du 22 au 23 octobre 2021, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

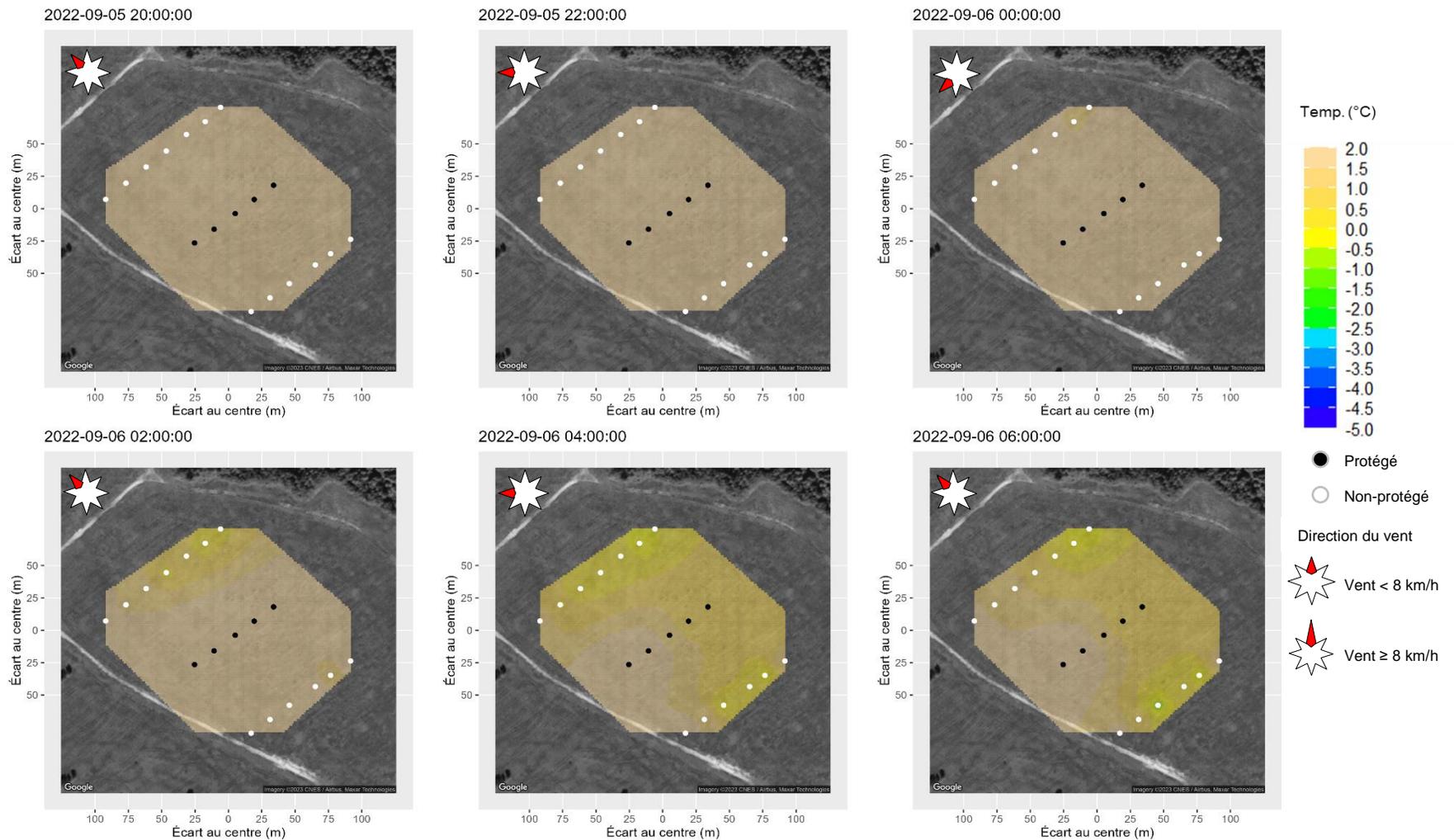


Figure 221. Au site « irrigation », courbes de niveau du site 2022 (aux 1 m) selon Info-Sols (2023). Les cuvettes sont représentées par des surfaces blanches.



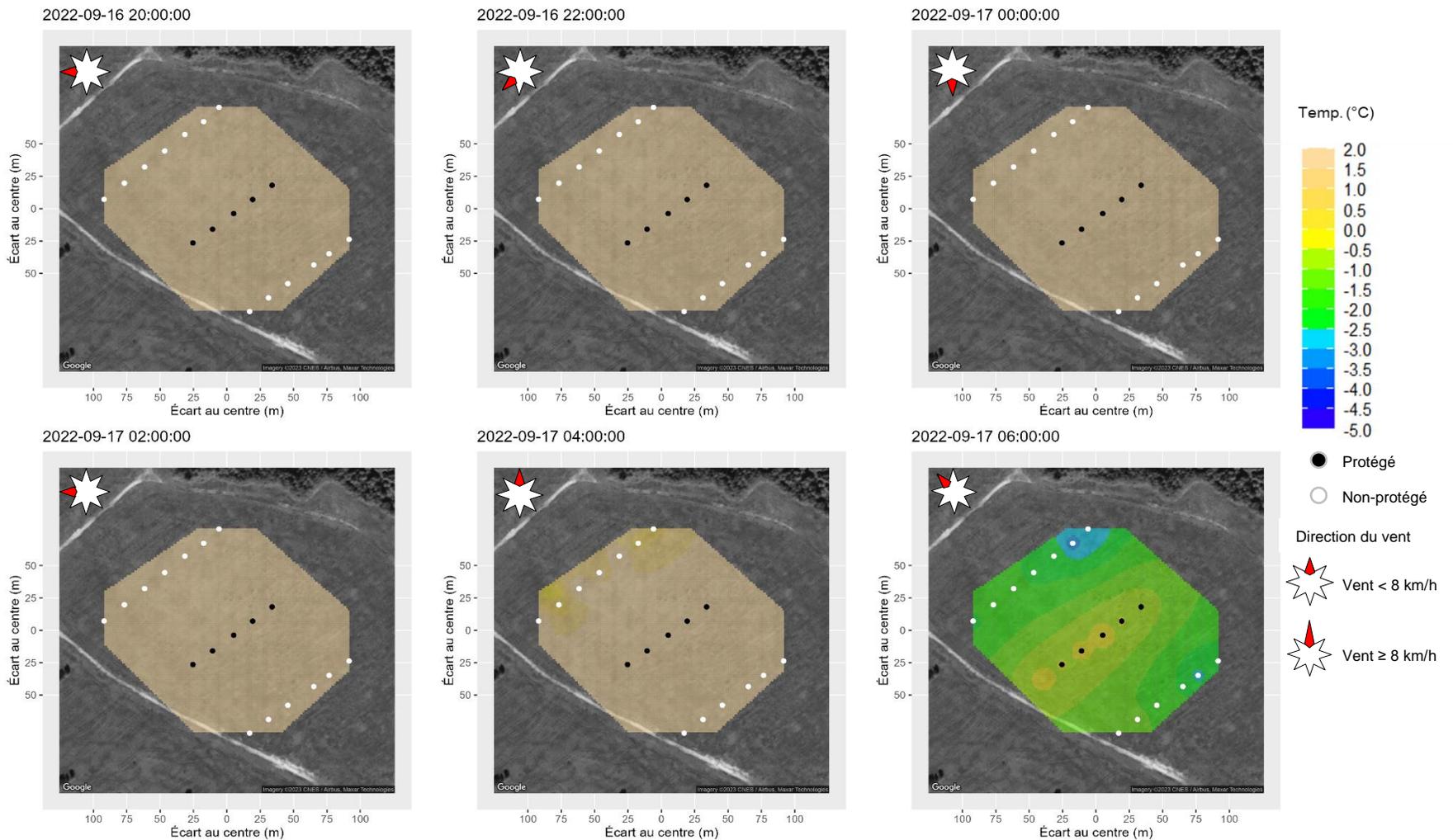
* Déclenchement de l'irrigation à 19 h 00.

Figure 222. Au site « irrigation » la nuit du 4 au 5 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



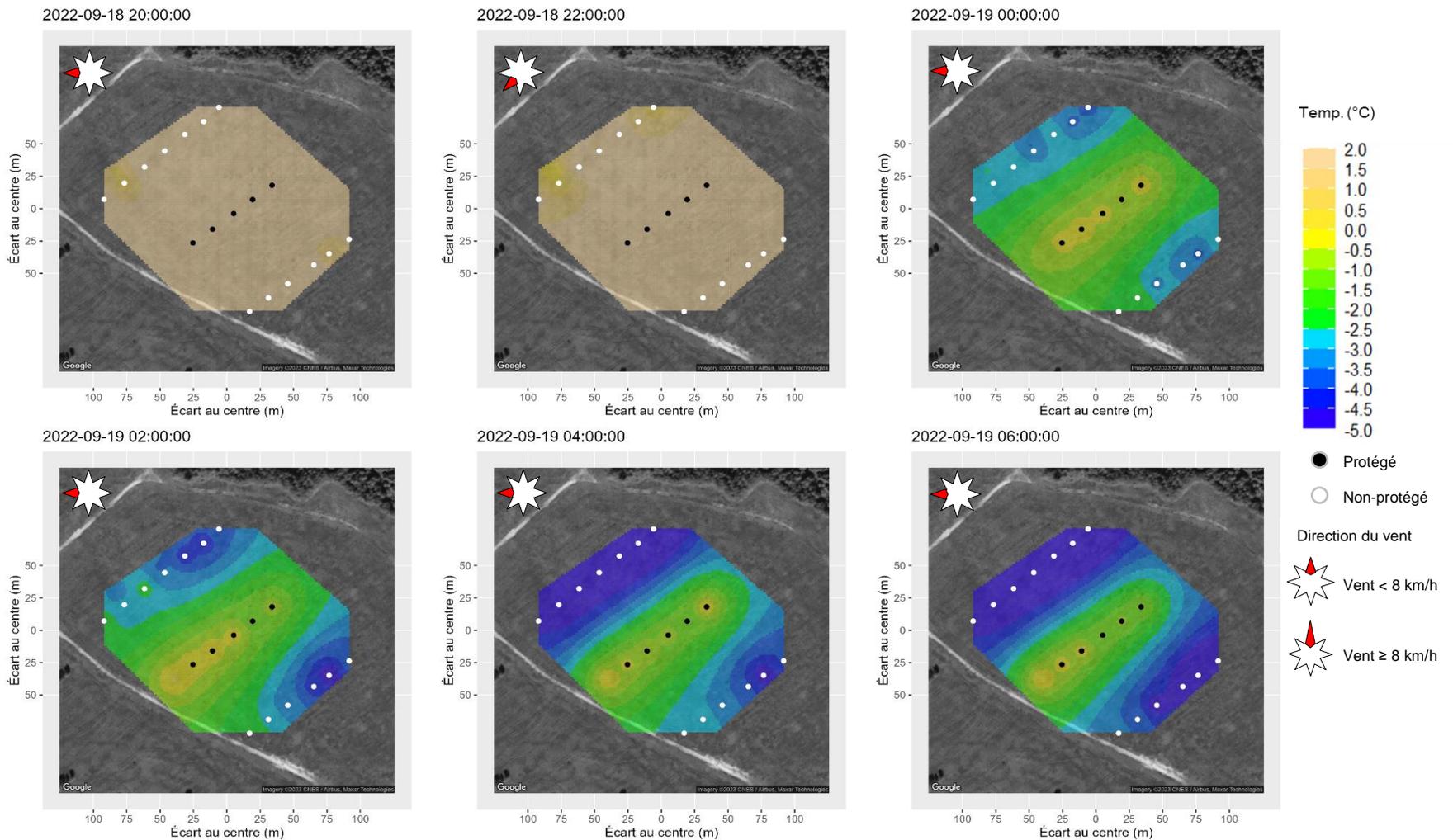
* Déclenchement de l'irrigation à 19 h 15.

Figure 223. Au site « irrigation » la nuit du 5 au 6 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



* Déclenchement de l'irrigation à 16 h 55.

Figure 224. Au site « irrigation » la nuit du 16 au 17 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.



* Déclenchement de l'irrigation à 17 h 40.

Figure 225. Au site « irrigation » la nuit du 18 au 19 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

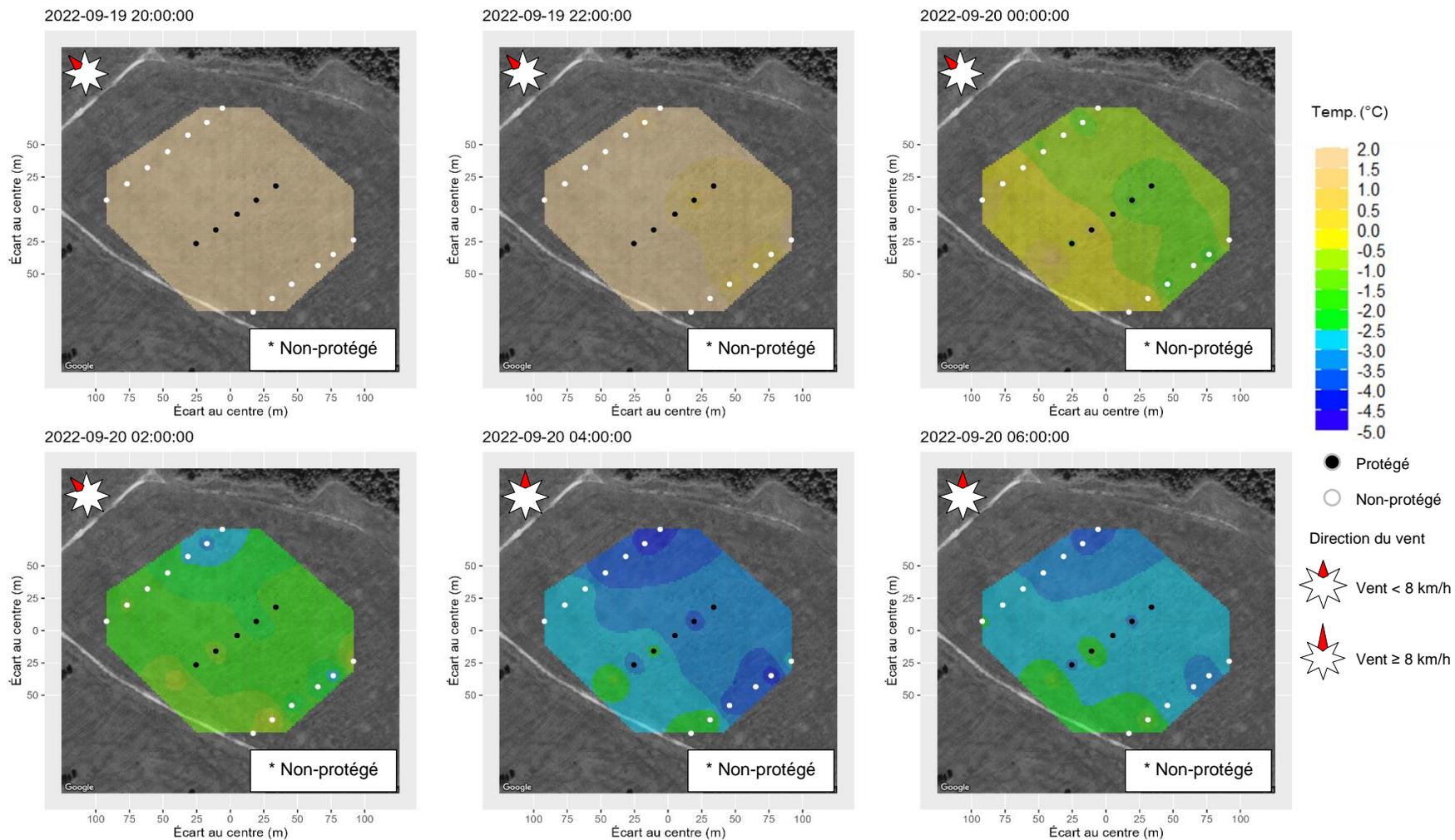


Figure 226. Au site « irrigation » la nuit du 19 au 20 septembre 2022, cartes d'interpolation spatiales des températures (°C) de l'air à la hauteur des fruits.

Annexe 9. Déterminer les coûts d'adoption, d'utilisation et d'entretien spécifiques à chaque méthode

Le rapport intégral reçu du Centre d'études sur les coûts de production en agriculture (CECPA) est annexé.

Projet pilote sur l'efficacité de
méthodes de protection contre le gel
des fruits pour le bleuet sauvage cultivé

Analyse économique

Rapport final

juillet 2023



TABLE DES MATIÈRES

MISE EN CONTEXTE.....	1
Mandat.....	1
Mise en garde.....	1
Assurance qualité.....	1
APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	1
Approche générale.....	1
Méthode d'analyse.....	2
ANALYSE.....	4
IRRIGATION PAR ASPERSION.....	4
Mise en contexte.....	4
Marges de l'irrigation par aspersion.....	5
Analyse de sensibilité irrigation par aspersion.....	5
Point mort de l'irrigation par aspersion.....	6
INSTALLATION DE BÂCHES.....	7
Mise en contexte.....	7
Marges des bâches.....	8
Analyse de sensibilité des bâches.....	8
Point mort des bâches.....	8
MACHINE À VENT.....	9
Mise en contexte.....	9
Marges de la machine à vent.....	10
Analyse de sensibilité irrigation machine à vent.....	10
Point mort de la machine à vent.....	11
DISCUSSION.....	12
ANNEXE 1.....	13
ANNEXE 2.....	14
ANNEXE 3.....	15
RÉFÉRENCES.....	16



LISTE DE FIGURES

Figure 1. Sommaire des marges	12
-------------------------------------	----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Répartition de la récolte selon les marchés et le nombre de semaines de la prolongation de récolte (kg)	2
Tableau 2. Revenus, frais et marges selon le marché estimé pour l'année 2022 (\$/kg vendu)	2
Tableau 3. Investissement et coûts fixes de l'irrigation par aspersion	4
Tableau 4. Coûts d'opérations de l'irrigation par aspersion	5
Tableau 5. Marges par semaine de prolongation.....	5
Tableau 6. Analyse de sensibilité : Irrigation par aspersion.....	6
Tableau 7. Point mort irrigation par aspersion.....	6
Tableau 8. Investissement et coûts fixes des bâches.....	7
Tableau 9. Coûts d'opération des bâches	7
Tableau 10. Marges par semaine de prolongation.....	8
Tableau 11. Analyse de sensibilité : installation de bâches.....	8
Tableau 12. Point mort des bâches	9
Tableau 13. Investissement et coûts fixes des machines à vent	9
Tableau 14. Coûts d'opération machine à vent.....	10
Tableau 15. Marges de la machine à vent.....	10
Tableau 16. Analyse de sensibilité : machine à vent	11
Tableau 17. Point mort de la machine à vent	11
Tableau 18. Analyse de sensibilité : Irrigation par aspersion semaine 1	13
Tableau 19. Analyse de sensibilité : Irrigation par aspersion semaine 2.....	13
Tableau 20. Analyse de sensibilité : Irrigation par aspersion semaine 3.....	13
Tableau 21. Analyse de sensibilité : Installation de bâches semaine 1	14
Tableau 22. Analyse de sensibilité : Installation de bâches semaine 2.....	14
Tableau 23. Analyse de sensibilité : Installation de bâches semaine 3.....	14
Tableau 24. Analyse de sensibilité : Machine à vent semaine 1.....	15
Tableau 25. Analyse de sensibilité : Machine à vent semaine 2.....	15
Tableau 26. Analyse de sensibilité : Machine à vent semaine 3.....	15



MISE EN CONTEXTE

Mandat

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) a réalisé le projet « Projet pilote sur l'efficacité de méthodes de protection contre le gel des fruits pour le bleuet sauvage cultivé ». L'Institut a sollicité l'appui du Centre d'études sur les coûts de production en agriculture (CECPA) pour la réalisation de l'analyse économique des données collectées par l'entremise des recherches sur le prolongement de la période de récolte de bleuet sauvage à l'état frais à partir de trois méthodes de protection contre le gel. Notre mandat consistait à faire une évaluation économique des méthodes de protection. Notre démarche s'articulait autour des éléments suivants :

- Évaluer les coûts annuels de chaque solution;
- Estimer la rentabilité des solutions;
- Appuyer l'analyse des résultats et des constats.

Mise en garde

Ce rapport a été préparé à la demande de l'IRDA dans le cadre du projet mentionné ci-haut. Toute diffusion nécessite une permission écrite de l'IRDA ou du CECPA. Nous n'assumons aucune responsabilité pour des pertes qui pourraient être occasionnées aux parties en cause, à leurs partenaires, à leurs administrateurs, à leurs employés ou à toute autre partie, à la suite de la circulation de la référence ou de l'utilisation de ce rapport. Pour finir, le CECPA se réserve le droit de réviser ses constats et ses conclusions si des informations pertinentes, antérieurement non disponibles ou non fournies, lui étaient communiquées subséquemment.

Assurance qualité

Un protocole de vérification interne a été établi afin de valider les processus d'analyse. Celui-ci a démontré l'absence d'anomalies significatives.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Approche générale

Le CECPA a utilisé les données transmises par l'IRDA, obtenues dans le cadre d'une étude scientifique réalisée à Normandin dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, entre 2020 et 2022. Celles-ci contenaient des données sur les superficies récoltées durant quatre semaines de prolongation de la saison de récolte pour la protection des fruits contre le gel, la machinerie et la main-d'œuvre utilisées pour les méthodes de protection ainsi que certaines références économiques sur le fonctionnement des systèmes de protection.

Dans cette étude, trois méthodes de protection contre le gel de bleuets sauvages frais ont été étudiées sur une période de quatre semaines les plus à risque de gel :

- Méthode 1 : Irrigation par système d'aspersion;
- Méthode 2 : Installation de bâche;
- Méthode 3 : Machine à vent.

En considérant que les rendements sont identiques, cette approche permet d'analyser les méthodes de protection et de comparer les coûts supplémentaires qu'occasionne l'adoption d'une méthode comparativement aux autres, et ainsi d'évaluer la rentabilité de pouvoir prolonger l'approvisionnement en bleuet sauvage frais cultivé pour les chaînes d'alimentation.



Méthode d'analyse

Notre analyse cherche à évaluer la rentabilité de prolonger la saison de production du bleuets destiné au marché frais. La récolte s'étend généralement sur quatre semaines. Dans cette présente étude, l'objectif est de vérifier si cette période peut s'étendre jusqu'à huit semaines en utilisant des méthodes de protection contre le gel, soit quatre semaines de prolongation, c'est-à-dire jusqu'au début octobre. À partir de la cinquième semaine, en raison du risque de gel, l'entreprise doit utiliser une méthode de protection pour prolonger sa saison. Plus spécifiquement, un regard est porté sur les montants à investir, les coûts fixes et les coûts d'opération des méthodes. L'analyse est présentée par semaine de prolongation de récolte 1 à 4, soit celles où un risque de gel est présent.

Les estimations sont basées sur certaines hypothèses. La superficie totale récoltée durant les semaines de prolongation 1 à 4 est de 10 hectares, soit 2,5 hectare par semaine. Ainsi, la superficie à protéger du gel est de 10 ha la semaine 1, 7,5 ha la semaine 2, 5 ha la semaine 3 et 2,5 ha la semaine 4. Le rendement utilisé est un rendement moyen au Québec de 2 475 kg par ha, tant pour le marché de frais que pour le marché de la transformation. L'hypothèse est que le taux de perte lors de la classification pour le frais est similaire au taux de perte lié à la récolte mécanisée pour le marché de la transformation.

À chaque semaine, on présente un scénario où la méthode de protection n'a pas fonctionné et où la récolte restante subit un gel. Dans ce scénario, l'entreprise dispose de quelques jours pour récolter les bleuets pour le marché de la transformation. On pose l'hypothèse que 2,5 ha peuvent être destinés à ce marché et que le reste de la récolte est perdu. Par exemple, advenant un gel à la fin de la deuxième semaine de prolongation de récolte, l'entreprise aura récolté 12 375 kg (5 ha) destinés au marché frais, elle pourra récolter 6 188 kg (2,5 ha) destinés au marché de la transformation et le reste de la récolte, soit 6 188 kg (2,5 ha) seront perdus. Le Tableau 1 synthétise les volumes récoltés par marché et par semaine.

Tableau 1. Répartition de la récolte selon les marchés et le nombre de semaines de la prolongation de récolte (kg)

Prolongation	1	2	3	4
Marché de frais	6 188	12 375	18 563	24 750
Marché de la transformation	6 188	6 188	6 188	0
Perte	12 375	6 188	0	0
Récolte totale	24 750	24 750	24 750	24 750

Le coût d'opportunité utilisé dans l'analyse est le marché de la transformation. Ainsi, l'analyse de la rentabilité repose sur l'écart entre la rentabilité de vendre un kilogramme de bleuets au marché de frais comparativement à ce même kilogramme vendu au marché de la transformation. Afin de simplifier l'analyse, les frais de production jusqu'à la récolte sont considérés constants et exclus de l'analyse. Le Tableau 2 présente la rentabilité pour les 2 marchés. Le marché du frais procure un revenu plus intéressant, mais également des frais de récolte ainsi que des frais de mise en marché (contenants, installations réfrigérées, transport plus éloigné, etc.) plus élevés. L'écart de rentabilité entre la vente au marché de frais et la vente au marché de la transformation est évalué à 3,22 \$ par kg.

Tableau 2. Revenus, frais et marges selon le marché estimé pour l'année 2022 (\$/kg vendu)

	Marché du frais	Marché de transformation	Écart
Prix de vente	13,23	1,63	11,60
Frais de récolte	7,17	0,24	6,93
Transport et mise en marché*	1,50	0,05	1,58
Marge sur récolte et mise en marché	4,56	1,34	3,22

* Estimés selon les frais observés pour le secteur de la fraise



La méthode d'analyse se base donc sur un budget partiel afin d'estimer les revenus et les coûts supplémentaires associés aux méthodes de protection permettant la vente au frais. À partir du budget partiel, un seuil de rentabilité est évalué.

Principales variables d'intérêt

Puisque les variables de rendement et de rentabilité selon le marché sont les mêmes entre les différentes méthodes de protection, les principales variables affectant la rentabilité d'une méthode sont :

- le coût d'investissement;
- les coûts fixes;
- le coût des opérations;
- le coût lié à la main-d'œuvre.

Le coût d'investissement

Dans l'analyse, le coût d'investissement provient de soumissions de fournisseurs. Il inclut les frais de transport et d'installation, le cas échéant.

Les coûts fixes

Les coûts fixes sont directement en lien avec le coût des investissements. Ils considèrent les frais d'amortissement, les intérêts et les frais d'entretien et réparation.

Le coût des opérations

Dans l'analyse, les coûts associés à la machinerie varient selon la superficie à protéger. Le type de machinerie est adapté à chaque technique de protection des bleuets sauvages. Cependant, la superficie récoltée est la même à chaque semaine et pour toutes les méthodes de protection, alors le temps alloué à la machinerie varie entre les semaines de récolte.

Le coût de la main-d'œuvre

Dans l'analyse, les coûts associés à la main-d'œuvre varient selon les superficies auxquelles les méthodes de protection sont appliquées. Cependant, la superficie récoltée est la même à chaque semaine et pour toutes les méthodes de protection, seulement le temps alloué à la main-d'œuvre varie entre les semaines de récolte. Le taux horaire est de 20,00 \$/h.

ANALYSE

L'analyse se décline en trois sections. La première présente la méthode de protection de l'irrigation par aspersion en exposant la marge, l'analyse de rentabilité de quatre semaines de prolongation de la saison de récolte pour le marché frais ainsi que le point mort. Les sections 2 et 3 sont similaires à la section 1, et présentent les méthodes de protection d'installation de bâches et de la machine à vent. En annexe, on retrouve les tables de sensibilité pour une, deux et trois semaines de prolongation, pour chacune des méthodes de protection.

IRRIGATION PAR ASPERSION

Mise en contexte

L'irrigation par aspersion est une méthode couramment utilisée dans les exploitations agricoles. Il suffit d'installer ce système avant le premier gel et de l'enlever après la dernière récolte. En cas de gel, le temps alloué à la main-d'œuvre est augmenté pour une surveillance plus accrue, surtout lors de la période nocturne. La durée de vie d'un système d'irrigation est de quinze ans. La superficie maximale de protection pour le système est de 10 ha. Le coût de la méthode de protection de l'irrigation par aspersion est basé sur une soumission de fournisseur d'équipement. Les coûts fixes annuels de cette méthode sont évalués à 26 812 \$ par année.

Tableau 3. Investissement et coûts fixes de l'irrigation par aspersion

	Total
Coût d'investissement	
Coût d'achat	186 410 \$
Transport	3 000 \$
Total de l'investissement	189 410 \$
Coûts fixes	
Installation et retrait du système	3 000 \$
Entretien	5 592 \$
Intérêts long terme	5 592 \$
Amortissement	12 627 \$
Total	26 812 \$
Total par ha	2 681 \$

Pour les coûts d'opération, on considère deux irrigations par semaine d'une durée de huit heures chacune. La superficie à arroser est de 10 hectares la première semaine de prolongation, puis diminue de 2,5 ha par semaine, considérant que 2,5 ha sont récoltés par semaine et ne sont plus arrosés. Les coûts de fonctionnement du tracteur et de la pompe, en plus du temps pour la surveillance, sont inclus. Une réduction du coût de fonctionnement du tracteur reflète la baisse de consommation de carburant puisque la puissance nécessaire décroît avec la réduction de la superficie arrosée. Pour sa part, l'entretien correspond essentiellement à remplacer des pièces endommagées, soit environ 5 % des équipements par année.



Tableau 4. Coûts d'opérations de l'irrigation par aspersion

Prolongation	1	2	3	4
Main-d'œuvre				
Superficie à protéger (ha)	10	7,5	5	2,5
Superficie arrosée (ha)	20	15	10	5
Coût tracteur 125 HP				
Entretien et réparation machinerie (\$/h)	110	99	87	75
Total	1 761 \$	1 576 \$	1 392 \$	1 207 \$
Coût par semaine à protéger				
Superficie récoltée (ha)	2,5	2,5	2,5	2,5
Semaine 1	440 \$	440 \$	440 \$	440 \$
Semaine 2		525 \$	464 \$	402 \$
Semaine 3			696 \$	603 \$
Semaine 4				1 207 \$

Marges de l'irrigation par aspersion

Le Tableau 5 présente la rentabilité du système pour 10 ha, selon le nombre de semaines de prolongation de la saison. Pour chaque semaine, on considère la vente de 2,5 ha supplémentaires destinés au marché du frais. La valeur comparative est la vente au marché de la transformation. Plus précisément, la prolongation d'une seule semaine entraîne la vente de 2,5 ha au marché frais, 2,5 ha au marché de la transformation et la perte de 5 ha. Ceci génère des revenus totaux de 36 488 \$ pour les 10 ha, soit des revenus excédentaires de 3 397 \$ comparativement à la vente de la totalité des 10 ha au marché de la transformation. Pour une semaine de prolongation, la marge est négative considérant que le coût du système surpasse les revenus excédentaires. Les semaines suivantes, soit 2, 3 et 4, sont profitables considérant que les revenus excédentaires progressent alors que les coûts, principalement fixes, sont plus stables.

Tableau 5. Marges par semaine de prolongation

Prolongation	1	2	3	4
Revenus vente transformation	33 091 \$	33 091 \$	33 091 \$	33 091 \$
Revenus excédentaires	3 397 \$	31 612 \$	59 827 \$	79 769 \$
Coûts supplémentaires totaux	28 573 \$	29 965 \$	31 264 \$	32 471 \$
Marge	(25 176) \$	1 647 \$	28 563 \$	47 299 \$

* selon la répartition des ventes du Tableau 1

Analyse de sensibilité irrigation par aspersion

Le protocole prévoit l'utilisation d'un rendement moyen provincial (CRAAQ, 2022), soit 2 475 kg/ha sur une superficie totale de production de 10 ha, en récoltant 2,5 ha par semaine de prolongation. Le prix du marché au détail de la vente du bleuet sauvage à l'état frais est de 13,23 \$/kg. Considérant une marge maximale de 47 299 \$ après le prolongement de quatre semaines pour une récolte de fruits frais de 10 ha, le Tableau 6 expose les résultats pour plusieurs rendements et prix de vente au frais. L'annexe 1 présente les tables de sensibilité des semaines de prolongation de la saison de récolte de 1, 2 et 3 semaines en exposant les résultats pour plusieurs rendements par hectare et les prix de vente au frais selon les marges.

Selon cette analyse, cette méthode de protection est rentable à partir d'un écart de revenu net (prix de vente moins les frais de récolte et de mise en marché) de 2,22 \$/kg entre le marché de frais et celui de la transformation. Évidemment, plus le rendement progresse, plus cette méthode de protection de récolte se rentabilise rapidement.

Tableau 6. Analyse de sensibilité : Irrigation par aspersion

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg par ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(29 181) \$	(28 066) \$	(26 951) \$	(25 836) \$	(24 721) \$	(23 606) \$
11,23	1,22	(14 431) \$	(8 316) \$	(2 201) \$	3 914 \$	10 029 \$	16 144 \$
12,23	2,22	319 \$	11 434 \$	22 549 \$	33 664 \$	44 779 \$	55 894 \$
13,23	3,22	15 069 \$	31 184 \$	47 299 \$	63 414 \$	79 529 \$	95 644 \$
14,23	4,22	29 819 \$	50 934 \$	72 049 \$	93 164 \$	114 279 \$	135 394 \$
15,23	5,22	44 569 \$	70 684 \$	96 799 \$	122 914 \$	149 029 \$	175 144 \$

Point mort de l'irrigation par aspersion

Le point mort est présenté en kg supplémentaires vendus au frais par année par rapport à la vente en congélation. La marge supplémentaire du frais correspond à la différence entre le prix de vente du frais moins le prix de la vente de congélation. Dans le cas de l'irrigation par aspersion, le Tableau 7 montre qu'il faut une production supplémentaire de 10 075 kg en fruit frais afin d'atteindre le seuil de rentabilité.

Tableau 7. Point mort irrigation par aspersion

	Total
Coût fixes	26 812 \$
Coûts variables	5 382 \$
Coûts supplémentaires	32 471 \$
Marge supplémentaire du frais	3,22 \$
Point mort (kg)	10 075

INSTALLATION DE BÂCHES

Mise en contexte

Six unités de bâches peuvent recouvrir 2,5 ha, soit la surface de récolte à chaque semaine. Les bâches sont installées sur la surface de culture et sont enlevées une fois par semaine pour la récolte. La durée de vie des actifs est de trois ans pour les bâches et de douze ans pour les autres éléments (enrouleur, entreposage, sacs de sable). Le coût d'investissement de la méthode est basé sur une soumission de fournisseur d'équipement.

Tableau 8. Investissement et coûts fixes des bâches

	Total
Coût d'investissement	
Bâches	62 208 \$
Enrouleur et entreposage	11 980 \$
Sacs et autres	20 887 \$
Total d'investissements	95 075 \$
Coûts fixes	
Entretien	2 852 \$
Intérêts long terme	2 852 \$
Amortissement bâches	20 736 \$
Amortissement enrouleur et entreposage	2 739 \$
Total	29 179 \$
Total par ha	2 918 \$

Pour les coûts d'opération, le nombre de poses total est de un à chaque semaine. Un remplacement de 3 % est estimé pour la totalité du système. Le temps alloué à la main-d'œuvre correspond donc à la superficie à protéger par le nombre de poses total de bâches à chaque semaine. Lors de période de gel, les bâches sont mises par la main-d'œuvre à un taux horaire de 20,00 \$/h.

Tableau 9. Coûts d'opération des bâches

Prolongation	1	2	3	4
Main-d'œuvre				
Superficie à protéger (ha)	10	7,5	5	2,5
Nombre de bâches	24	18	12	6
Superficie à protéger (ha)	20	15	10	5
Coût tracteur 60 HP				
Machinerie	49	49	49	49
Total	1 770 \$	1 570 \$	1 370 \$	1 170 \$
Coût par semaine à protéger				
Superficie récoltée (ha)	2,5	2,5	2,5	2,5
Semaine 1	443 \$	443 \$	443 \$	443 \$
Semaine 2		523 \$	523 \$	523 \$
Semaine 3			685 \$	685 \$
Semaine 4				1 170 \$



Marges des bâches

Les marges sont actualisées à l'année 2022 et présentées en dollars. Le Tableau 10 permet de considérer le rendement moyen de la vente à la congélation en présence de risque de gel, ainsi que la marge après récolte selon les frais de mise en marché du bleuets frais. Pour les semaines 3 et 4, elles sont positives puisque le revenu est plus élevé avec la vente au frais que celle en congélation.

Tableau 10. Marges par semaine de prolongation

Prolongation	1	2	3	4
Revenus vente transformation	33 091 \$	33 091 \$	33 091 \$	33 091 \$
Revenus excédentaires	3 397 \$	31 612 \$	59 827 \$	79 769 \$
Coûts supplémentaires totaux	30 950 \$	32 520 \$	33 891 \$	35 061 \$
Marge	(27 553) \$	(908) \$	25 936 \$	44 708 \$

* selon la répartition des ventes du Tableau 1

Analyse de sensibilité des bâches

Le protocole prévoit l'utilisation d'un rendement similaire basé sur les données du CRAAQ en 2022, soit 2 475 kg/ha sur une superficie totale de production de 10 ha, en récoltant durant les semaines de prolongation 1 à 4 une superficie de 2,5 ha par semaine. Le prix du marché au détail de la vente du bleuets sauvage à l'état frais est de 13,23 \$/kg. Considérant une marge maximale de 44 708 \$ après 4 semaines de prolongation pour une récolte de fruit frais de 10 ha, le Tableau 11 affiche les résultats pour plusieurs rendements et prix de vente au frais. Pour les marges des semaines de prolongation 1, 2 et 3, l'annexe 2 présente les tables de sensibilité selon plusieurs rendements par hectare et les prix de vente au frais.

Tableau 11. Analyse de sensibilité : installation de bâches

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg/ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(31 772) \$	(30 657) \$	(29 542) \$	(28 427) \$	(27 312) \$	(26 197) \$
11,23	1,22	(17 022) \$	(10 907) \$	(4 792) \$	1 323 \$	7 438 \$	13 553 \$
12,23	2,22	(2 272) \$	8 843 \$	19 958 \$	31 073 \$	42 188 \$	53 303 \$
13,23	3,22	12 478 \$	28 593 \$	44 708 \$	60 823 \$	76 938 \$	93 053 \$
14,23	4,22	27 228 \$	48 343 \$	69 458 \$	90 573 \$	111 688 \$	132 803 \$
15,23	5,22	41 978 \$	68 093 \$	94 208 \$	120 323 \$	146 438 \$	172 553 \$

Point mort des bâches

Le point mort des bâches est présenté en kg supplémentaires vendus au frais par année par rapport à la vente en congélation. La marge supplémentaire du frais correspond à la différence entre le prix de vente du frais moins le prix de la vente de congélation. Pour atteindre le seuil de rentabilité des bâches, il faut 10 878 kg supplémentaires en fruits frais.



Tableau 12. Point mort des bâches

	Total
Coût fixes	29 179 \$
Coûts variables	5 881,60 \$
Coûts supplémentaires	35 061 \$
Marge supplémentaire du frais	3,22 \$
Point mort (kg)	10 878

MACHINE À VENT

Mise en contexte

Le coût de la méthode de protection de la machine à vent est basé sur une soumission des fournisseurs d'équipement. La machine à vent consiste à rabattre la masse d'air chaud située en hauteur, résultant de l'inversion de température nocturne. Ce système est installé avant le premier gel et activé lors des nuits où le risque de gel au niveau des fruits est présent. La durée de vie du système est estimée à douze ans. Une unité de machine à vent recouvre une superficie de 2,5 ha, ce qui représente la récolte hebdomadaire.

Tableau 13. Investissement et coûts fixes des machines à vent

Coût d'investissement	Total
Machine à vent (4 unités)	215 000 \$
Total d'investissements	215 000 \$
Coûts fixes	
Installation	320 \$
Entretien	6 450 \$
Intérêts long terme	6 450 \$
Amortissement	17 917 \$
Total	31 137 \$
Total par ha	3 114 \$

Pour les coûts d'opération, le nombre d'activations de la machine à vent est de deux à chaque semaine sur une période de huit heures. Un remplacement pour l'entretien du système est estimé à 3 % pour la totalité de l'investissement. Le temps alloué à la main-d'œuvre correspond à la superficie à protéger par le nombre d'activations de la machine à vent. En cas de période de gel, le temps alloué à la main-d'œuvre correspond à la manutention du réservoir de diesel à un taux horaire de 20,00 \$/h.



Tableau 14. Coûts d'opération machine à vent

Prolongation	1	2	3	4
Main-d'œuvre				
Superficie à protéger (ha)	10	7,5	5	2,5
Nombre de machine en fonction	4	3	2	1
Superficie à protéger	20	15	20	5
Coût machine Tow and Blow				
Main-d'œuvre	160 \$	120 \$	80 \$	40 \$
Diesel \$/L (réservoir = 60L)	63 \$	47 \$	32 \$	16 \$
Total	1 173 \$	880 \$	586 \$	293 \$
Coût par semaine à protéger				
Superficie récoltée (ha)	2,5	2,5	2,5	2,5
Semaine 1	293 \$	293 \$	293 \$	293 \$
Semaine 2		293 \$	293 \$	293 \$
Semaine 3			293 \$	293 \$
Semaine 4				293 \$

Marges de la machine à vent

Les marges sont actualisées à l'année 2022 et présentées en dollars. Le Tableau 15 montre les marges après récolte et les frais de mise en marché en prenant en compte le rendement moyen de la vente de congélation en présence de risque de gel. Pour les semaines de prolongation 3 et 4, les marges sont positives puisque le nombre d'hectares récoltés est maximal, ce qui permet un revenu plus élevé avec la vente au frais que la vente de fruits congelés.

Tableau 15. Marges de la machine à vent

Prolongation	1	2	3	4
Revenus vente transformation	33 091 \$	33 091 \$	33 091 \$	33 091 \$
Revenus excédentaires	3 397 \$	31 612 \$	59 827 \$	79 769 \$
Coûts supplémentaires totaux	32 309 \$	33 189 \$	33 775 \$	34 069 \$
Marges	(28 913) \$	(1 577) \$	26 051 \$	45 701 \$

Analyse de sensibilité irrigation machine à vent

Pour les semaines de prolongation 1 à 4, les données du rendement de 2 475 \$/kg et de la vente du bleuets sauvage frais de 13,23 \$/kg sont estimés à partir des données du CRAAQ en 2022. Le protocole se déroule sur une superficie de 10 ha en prolongeant la saison de récolte de 1 à 4 semaines, en récoltant 2,5 ha par semaine. La marge maximale à la semaine 4 pour une récolte de fruits frais sur 10 ha est de 45 701 \$. Le Tableau 16 détaille les résultats d'une table de sensibilité pour plusieurs rendements et prix de vente au frais. L'annexe 3 présente les tables de sensibilité des semaines 1, 2 et 3 en présentant différents rendements par hectare et prix de vente au frais selon les marges.



Tableau 16. Analyse de sensibilité : machine à vent

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg/ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(30 779) \$	(29 664) \$	(28 549) \$	(27 434) \$	(26 319) \$	(25 204) \$
11,23	1,22	(16 029) \$	(9 914) \$	(3 799) \$	2 316 \$	8 431 \$	14 546 \$
12,23	2,22	(1 279) \$	9 836 \$	20 951 \$	32 066 \$	43 181 \$	54 296 \$
13,23	3,22	13 471 \$	29 586 \$	45 701 \$	61 816 \$	77 931 \$	94 046 \$
14,23	4,22	28 221 \$	49 336 \$	70 451 \$	91 566 \$	112 681 \$	133 796 \$
15,23	5,22	42 971 \$	69 086 \$	95 201 \$	121 316 \$	147 431 \$	173 546 \$

Point mort de la machine à vent

Le point mort est présenté en kg supplémentaires vendus au frais par année par rapport à la vente en congélation. La marge supplémentaire du frais correspond à la différence entre le prix de vente du frais moins le prix de la vente de congélation. La machine à vent nécessite donc un seuil de rentabilité de 10 570 kg supplémentaires en fruits frais.

Tableau 17. Point mort de la machine à vent

	Total
Coût fixes	31 137 \$
Coûts variables	2 932 \$
Coûts supplémentaires	34 069 \$
Marge supplémentaire du frais	3,22 \$
Point mort (kg)	10 570



DISCUSSION

Le projet de recherche repose sur des essais de prolongation de la saison de récolte à partir de trois méthodes de protection contre le gel dans le bleuet sauvage frais sur une période de quatre semaines. Les trois méthodes suivantes ont été analysées : l'irrigation par aspersion, l'installation de bâches et la machine à vent. À cet effet, les résultats et les constats sont répertoriés sur chacune des superficies de récolte de 2,5 ha par semaine considérant qu'un gel pourrait endommager la culture au complet la semaine suivante.

La Figure 1 présente le sommaire des marges pour les trois méthodes de protection contre le gel dans le bleuet. En termes de coûts, les trois méthodes présentent des résultats similaires. C'est donc principalement l'efficacité des méthodes de protection contre le gel qui les distingue.



Figure 1. Marges selon le nombre de semaines de prolongation de la saison pour les trois méthodes de protection

Malgré que les trois méthodes ne procurent pas de différences marquantes entre les revenus pour les semaines de prolongation de la récolte, il pourrait être intéressant de distinguer leur efficacité par leur utilisation sur les coûts fixes. En effet, sachant que l'expérience a été réalisée durant la saison d'automne dans un but de protéger la culture contre le gel, les coûts sont répartis seulement sur les quatre semaines à l'étude. Pourtant, en considérant l'utilisation des méthodes de prolongation pour une utilité différente, comme l'irrigation lors de sécheresse durant la période estivale, le coût d'investissement pourrait être réparti différemment, ce qui permettrait une différence supérieure au niveau économique.

Tableau 18. Analyse de sensibilité : Irrigation par aspersion semaine 1

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg/ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(37 611) \$	(40 675) \$	(43 739) \$	(46 803) \$	(49 866) \$	(52 930) \$
11,23	1,22	(33 924) \$	(35 738) \$	(37 551) \$	(39 365) \$	(41 179) \$	(42 993) \$
12,23	2,22	(30 236) \$	(30 800) \$	(31 364) \$	(31 928) \$	(32 491) \$	(33 055) \$
13,23	3,22	(26 549) \$	(25 863) \$	(25 176) \$	(24 490) \$	(23 804) \$	(23 118) \$
14,23	4,22	(22 861) \$	(20 925) \$	(18 989) \$	(17 053) \$	(15 116) \$	(13 180) \$
15,23	5,22	(19 174) \$	(15 988) \$	(12 801) \$	(9 615) \$	(6 429) \$	(3 243) \$

Tableau 19. Analyse de sensibilité : Irrigation par aspersion semaine 2

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg/ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(28 797) \$	(27 961) \$	(27 125) \$	(26 288) \$	(25 452) \$	(24 616) \$
11,23	1,22	(17 735) \$	(13 148) \$	(8 562) \$	(3 976) \$	610 \$	5 197 \$
12,23	2,22	(6 672) \$	1 664 \$	10 000 \$	18 337 \$	26 673 \$	35 009 \$
13,23	3,22	4 390 \$	16 477 \$	28 563 \$	40 649 \$	52 735 \$	64 822 \$
14,23	4,22	15 453 \$	31 289 \$	47 125 \$	62 962 \$	78 798 \$	94 634 \$
15,23	5,22	26 515 \$	46 102 \$	65 688 \$	85 274 \$	104 860 \$	124 447 \$

Tableau 20. Analyse de sensibilité : Irrigation par aspersion semaine 3

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg/ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(28 797) \$	(27 961) \$	(27 124) \$	(26 288) \$	(25 452) \$	(24 616) \$
11,23	1,22	(17 734) \$	(13 148) \$	(8 562) \$	(3 976) \$	611 \$	5 197 \$
12,23	2,22	(6 672) \$	1 664 \$	10 001 \$	18 337 \$	26 673 \$	35 009 \$
13,23	3,22	4 391 \$	16 477 \$	28 563 \$	40 649 \$	52 736 \$	64 822 \$
14,23	4,22	15 453 \$	31 289 \$	47 126 \$	62 962 \$	78 798 \$	94 634 \$
15,23	5,22	26 516 \$	46 102 \$	65 688 \$	85 274 \$	104 861 \$	124 447 \$



Tableau 21. Analyse de sensibilité : Installation de bâches semaine 1

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg/ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(28 797) \$	(27 961) \$	(27 125) \$	(26 288) \$	(25 452) \$	(24 616) \$
11,23	1,22	(17 735) \$	(13 148) \$	(8 562) \$	(3 976) \$	610 \$	5 197 \$
12,23	2,22	(6 672) \$	1 664 \$	10 000 \$	18 337 \$	26 673 \$	35 009 \$
13,23	3,22	4 390 \$	16 477 \$	28 563 \$	40 649 \$	52 735 \$	64 822 \$
14,23	4,22	15 453 \$	31 289 \$	47 125 \$	62 962 \$	78 798 \$	94 634 \$
15,23	5,22	26 515 \$	46 102 \$	65 688 \$	85 274 \$	104 860 \$	124 447 \$

Tableau 22. Analyse de sensibilité : Installation de bâches semaine 2

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg/ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(28 797) \$	(27 961) \$	(27 125) \$	(26 288) \$	(25 452) \$	(24 616) \$
11,23	1,22	(17 735) \$	(13 148) \$	(8 562) \$	(3 976) \$	610 \$	5 197 \$
12,23	2,22	(6 672) \$	1 664 \$	10 000 \$	18 337 \$	26 673 \$	35 009 \$
13,23	3,22	4 390 \$	16 477 \$	28 563 \$	40 649 \$	52 735 \$	64 822 \$
14,23	4,22	15 453 \$	31 289 \$	47 125 \$	62 962 \$	78 798 \$	94 634 \$
15,23	5,22	26 515 \$	46 102 \$	65 688 \$	85 274 \$	104 860 \$	124 447 \$

Tableau 23. Analyse de sensibilité : Installation de bâches semaine 3

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg/ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(31 424) \$	(30 587) \$	(29 751) \$	(28 915) \$	(28 079) \$	(27 242) \$
11,23	1,22	(20 361) \$	(15 775) \$	(11 189) \$	(6 602) \$	(2 016) \$	2 570 \$
12,23	2,22	(9 299) \$	(962) \$	7 374 \$	15 710 \$	24 046 \$	32 383 \$
13,23	3,22	1 764 \$	13 850 \$	25 936 \$	38 023 \$	50 109 \$	62 195 \$
14,23	4,22	12 826 \$	28 663 \$	44 499 \$	60 335 \$	76 171 \$	92 008 \$
15,23	5,22	23 889 \$	43 475 \$	63 061 \$	82 648 \$	102 234 \$	121 820 \$



ANNEXE 3

Tableau 24. Analyse de sensibilité : Machine à vent semaine 1

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg/ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(28 797) \$	(27 961) \$	(27 125) \$	(26 288) \$	(25 452) \$	(24 616) \$
11,23	1,22	(17 735) \$	(13 148) \$	(8 562) \$	(3 976) \$	610 \$	5 197 \$
12,23	2,22	(6 672) \$	1 664 \$	10 000 \$	18 337 \$	26 673 \$	35 009 \$
13,23	3,22	4 390 \$	16 477 \$	28 563 \$	40 649 \$	52 735 \$	64 822 \$
14,23	4,22	15 453 \$	31 289 \$	47 125 \$	62 962 \$	78 798 \$	94 634 \$
15,23	5,22	26 515 \$	46 102 \$	65 688 \$	85 274 \$	104 860 \$	124 447 \$

Tableau 25. Analyse de sensibilité : Machine à vent semaine 2

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg/ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(28 797) \$	(27 961) \$	(27 125) \$	(26 288) \$	(25 452) \$	(24 616) \$
11,23	1,22	(17 735) \$	(13 148) \$	(8 562) \$	(3 976) \$	610 \$	5 197 \$
12,23	2,22	(6 672) \$	1 664 \$	10 000 \$	18 337 \$	26 673 \$	35 009 \$
13,23	3,22	4 390 \$	16 477 \$	28 563 \$	40 649 \$	52 735 \$	64 822 \$
14,23	4,22	15 453 \$	31 289 \$	47 125 \$	62 962 \$	78 798 \$	94 634 \$
15,23	5,22	26 515 \$	46 102 \$	65 688 \$	85 274 \$	104 860 \$	124 447 \$

Tableau 26. Analyse de sensibilité : Machine à vent semaine 3

Prix du marché frais (\$)	Écart frais vs transformation (\$)	Rendement (kg/ha)					
		1 475 kg	1 975 kg	2 475 kg	2 975 kg	3 475 kg	3 975 kg
10,23	0,22	(31 309) \$	(30 472) \$	(29 636) \$	(28 800) \$	(27 964) \$	(27 127) \$
11,23	1,22	(20 246) \$	(15 660) \$	(11 074) \$	(6 487) \$	(1 901) \$	2 685 \$
12,23	2,22	(9 184) \$	(847) \$	7 489 \$	15 825 \$	24 161 \$	32 498 \$
13,23	3,22	1 879 \$	13 965 \$	26 051 \$	38 138 \$	50 224 \$	62 310 \$
14,23	4,22	12 941 \$	28 778 \$	44 614 \$	60 450 \$	76 286 \$	92 123 \$
15,23	5,22	24 004 \$	43 590 \$	63 176 \$	82 763 \$	102 349 \$	121 935 \$



RÉFÉRENCES

Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. (2022). *Bleuet nain semi cultivé – Budget d'entreprise*. AGDEX 235/821b.

Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. (2022). *Machinerie - Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés*. AGDEX 740/855.

Centre d'études sur les coûts de production en agriculture. (2020). *Portrait technico-économique du secteur de la fraise au Québec*.





CECPA

CENTRE D'ÉTUDES SUR LES COÛTS
DE PRODUCTION EN AGRICULTURE

225, rue Montfort, bureau 300 | Lévis (Québec) | G6W 3L8

T : 418 833-2515 | F : 418 933-9125 | www.cecpa.qc.ca