

**Analyse des éléments climatiques - environnemen-  
taux et de leurs influences sur la formation et sur l'in-  
tensité du gel radiatif dans un vignoble de Chaudière-  
Appalaches**



**Vahid Ikani, PhD, Consultant en agrométéorologie**  
**Février 2022**

## **1. Introduction**

Plusieurs moyens de protection pour lutter contre les gelées par rayonnement existent, mais, jusqu'à présent, aucun ne semble apporter de solution idéale (Even, 2017). La mise en œuvre d'un système de protection contre le gel au mauvais moment ou dans de mauvaises conditions peut parfois s'avérer plus dommageable que de ne rien faire du tout. En effet, pour mettre en place une technique efficace de lutte active ou passive contre le gel, on doit bien connaître la variabilité spatiotemporelle des éléments climatiques (température et humidité de l'air) en fonction des facteurs micro topographiques et micro-environnementaux (Ikani, 2019). Une connaissance approfondie des schémas spatiotemporels de la température de l'air et du microclimat s'avère donc essentielle si on veut aider les agriculteurs à prendre des mesures adéquates pour atténuer les effets du gel sur leur production. Avant de choisir et d'optimiser un système de protection contre le gel, il est important d'avoir une connaissance détaillée de l'interaction entre le microclimat et la température nocturne du terrain (Ikani, 2019), car bien connaître la variabilité spatiale de la température en fonction des paramètres environnementaux est un prérequis pour la mise au point d'une méthode opérationnelle et efficace de protection contre le gel (Figueras et Mazzeo, 1997).

Ce projet a démarré en septembre 2021 au vignoble Clos Lambert. L'objectif était de concevoir et de présenter un plan d'action basé sur l'état microclimatique du terrain. Les résultats de ces recherches serviront à concevoir un système de protection contre le gel adapté au vignoble. Le site d'une superficie d'environ trois hectares est situé à Lévis, dans la région de Chaudière-Appalaches, à une altitude de 65 m; Latitude : 46°44'12.31"N, Longitude : 71°10'40.98"O.

Les résultats de ce projet préliminaire serviront à développer et à mettre en place un système de protection contre le gel adapté à la réalité géo climatique spécifique à ce vignoble.

## **2. Objectifs**

Objectif principal : mieux comprendre la variabilité spatio-temporelle de la température et de l'humidité de l'air durant une période de gel radiatif.

Objectifs spécifiques :

2. 1) Détecter le mécanisme de formation et de développement du gel dans un vignoble ;
2. 2) Détecter l'influence de la micro-topographie et du micro-environnement du terrain sur le gel ;
2. 3) Évaluer les zones à risque de gel et l'influence de la route asphaltée ainsi que du fossé de route sur ces zones à risque ;
2. 4) Proposer un plan d'intervention pour prévenir les gels au vignoble.

### **3. Méthodologie**

La méthode présentée se base sur les données temporelles fournies par des réseaux de sondes météorologiques, sur les données spatiales fournies par différentes cartes thématiques ainsi que sur des observations menées sur le terrain. La méthodologie compte trois étapes : 1) la configuration et l'installation de réseaux de capteurs ; 2) la caractérisation de la variabilité spatiotemporelle de la température et de l'humidité et 3) la réalisation de cartes thématiques.

#### **3.1. Configuration et installation des réseaux de capteurs**

La méthodologie est basée sur un réseau d'enregistreurs de données à haute résolution, ce qui exige d'installer un réseau de 50 enregistreurs de données de température et d'humidité. L'étude météorologique et micro météorologique des mécanismes de gel a été effectuée entre le 15 septembre et le 30 novembre 2021. Pendant cette période, nous avons sélectionné trois nuits pendant lesquelles les conditions synoptiques des gelées par rayonnement (radiatif) ont permis l'enregistrement des données de température et d'humidité de l'air. La figure 1 illustre le réseau d'enregistreurs installés à une hauteur de 45 cm par rapport au sol et à 35m les uns des autres; les lectures ont été prises à un intervalle de 15 minutes.

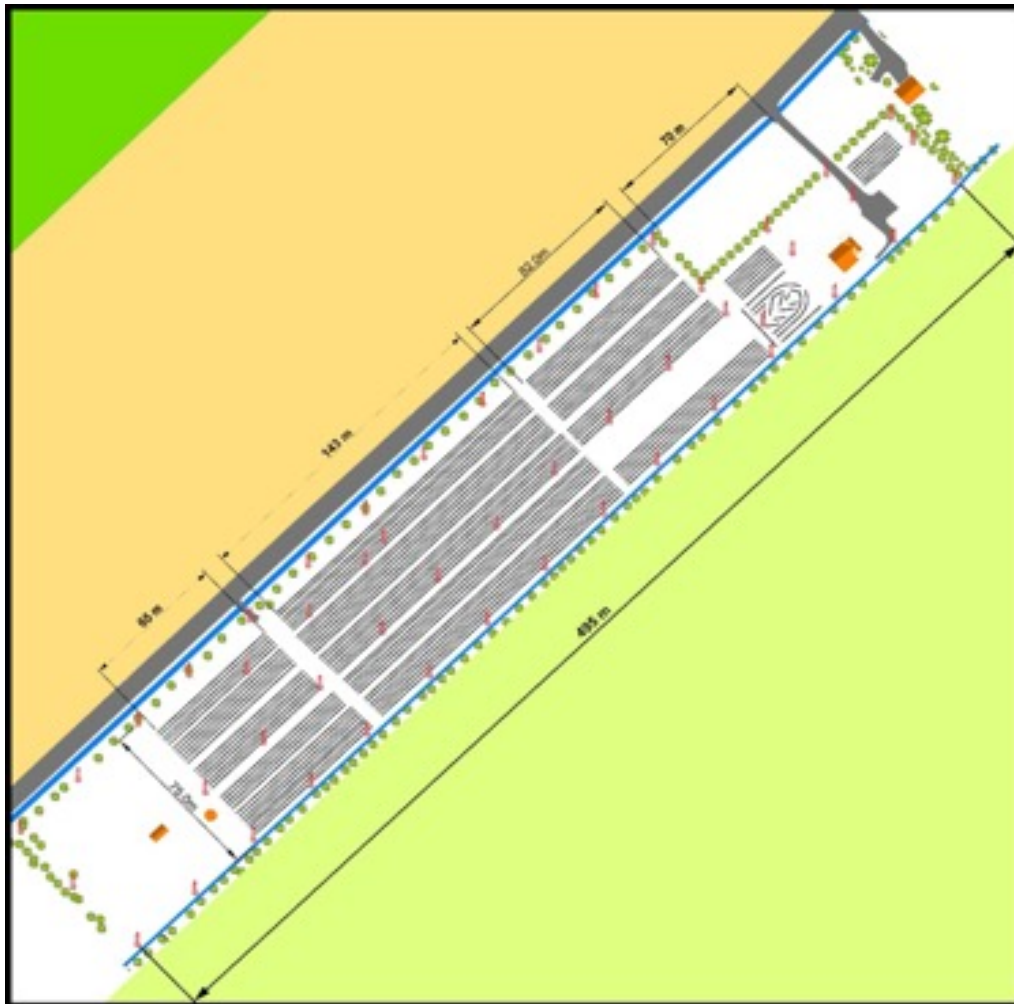


Figure 1. Illustration du réseau de sondes (rouge) sur le terrain

### 3.2. Modélisation de la variabilité spatiotemporelle de la température et de l'humidité

Après avoir acquis les données sur le terrain, nous avons réalisé une modélisation spatiale et temporelle sur l'ensemble de l'aire étudiée. Cela nous a permis de représenter les aires susceptibles de subir du gel et de produire des documents cartographiques destinés aux propriétaires. En effet, pour pouvoir élaborer un système de protection efficace contre le gel, il faut d'abord identifier les mécanismes de formation de gel ainsi que les parties du terrain les plus susceptibles au gel, ce que permet la modélisation. Visualiser la variation spatiotemporelle de la température nocturne nous permet effectivement de détecter le mécanisme de formation de gel dans le vi-

gnoble. C'est ainsi que les résultats de la modélisation, basés sur les données fournies par les capteurs, nous ont permis de réaliser 70 images géoréférencées qui illustrent la variation spatiotemporelle des températures nocturnes et de l'humidité. Nous avons également réalisé trois vidéos, un pour chaque soirée sélectionnée, qui illustrent ces variations.

### **3.3. Réalisation des cartes thématiques**

Un modèle numérique d'élévation haute résolution généré à partir de données LiDAR (light detection and ranging) nous permet de réaliser des cartes thématiques qui nous permettent de détecter les zones où il y a le plus de probabilité d'accumulation d'air frais. Ces informations permettent de repérer rapidement les zones de convergence et divergence de l'air froid. Nous avons ainsi réalisé une carte topographique, une carte d'écoulement de l'air, qui montre la trajectoire que suit l'air frais, et une carte de direction principale de l'écoulement de l'air. De plus, nous avons réalisé deux cartes du potentiel d'énergie solaire (mai et septembre). Ces cartes du potentiel d'énergie solaire nous permettent de détecter la distribution spatiale de l'énergie solaire dans le vignoble.

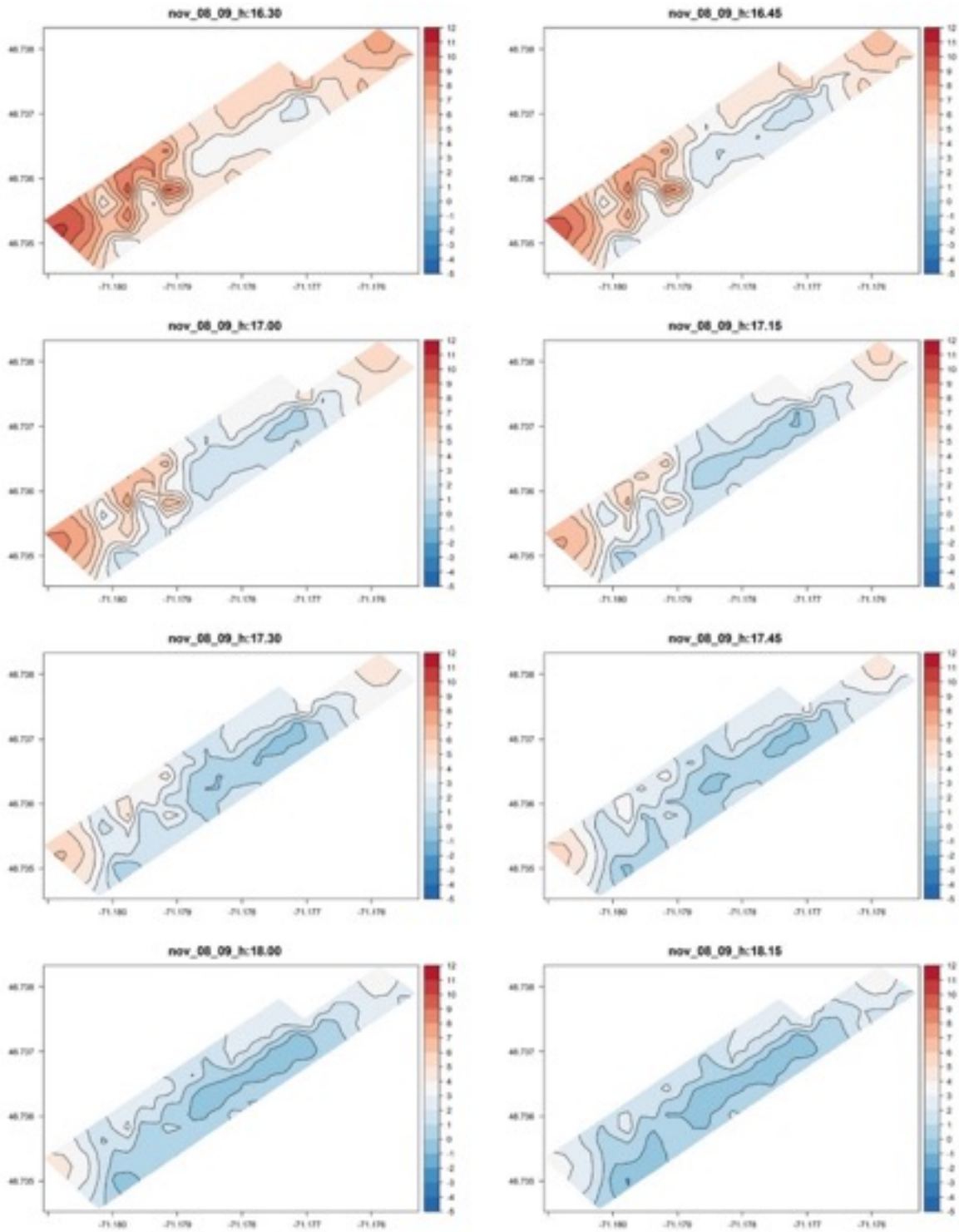
Une bonne connaissance des conditions microclimatiques et physiques de l'atmosphère nous permettront de choisir la méthode la plus appropriée pour lutter contre le gel, en tenant compte des conditions environnementales (Rossi et coll., 2001). L'analyse de la manière dont les données sur les variations spatiotemporelles se combinent et la production des cartes thématiques nous permettra de comprendre les mécanismes de formation du gel dans le vignoble.

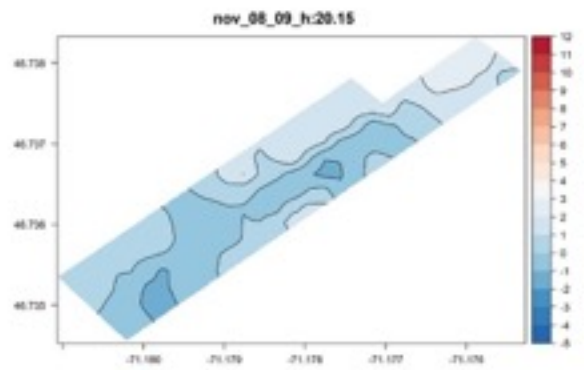
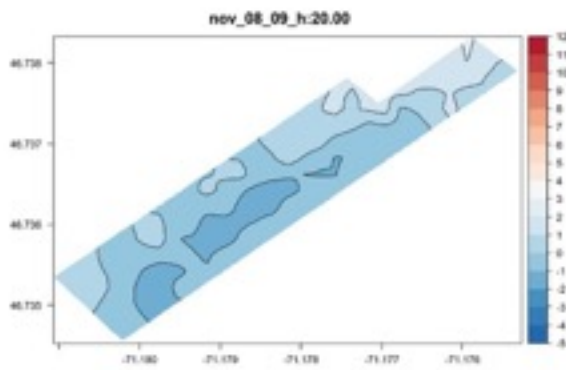
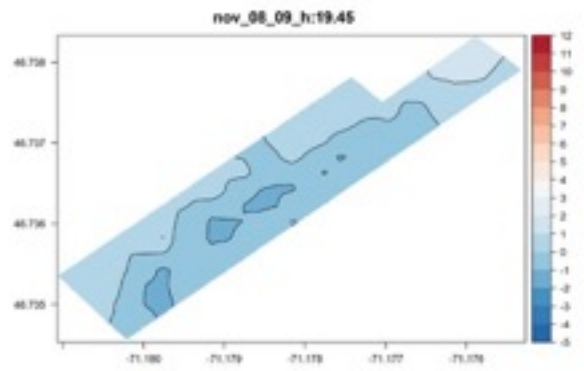
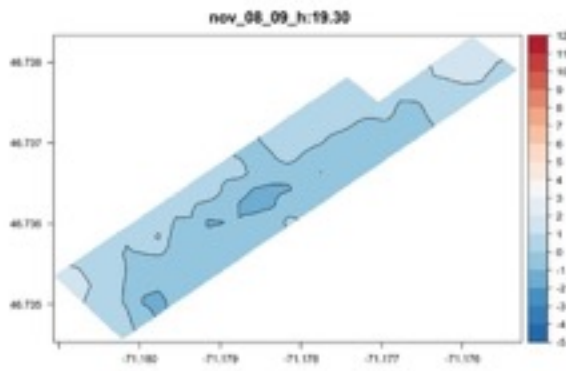
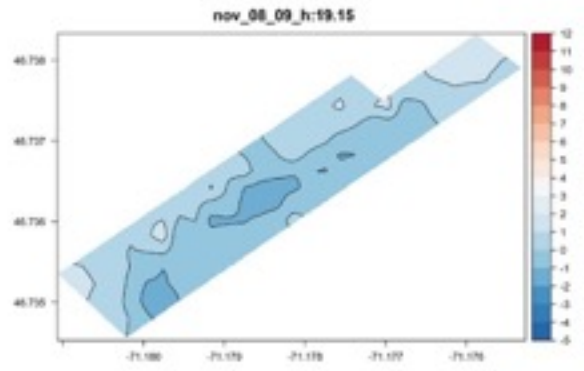
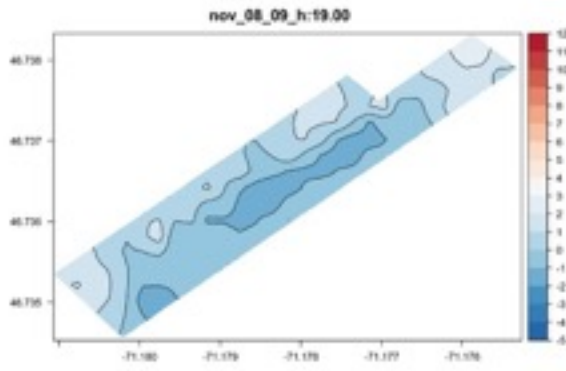
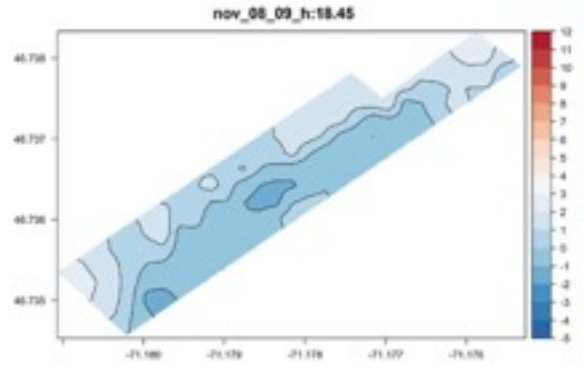
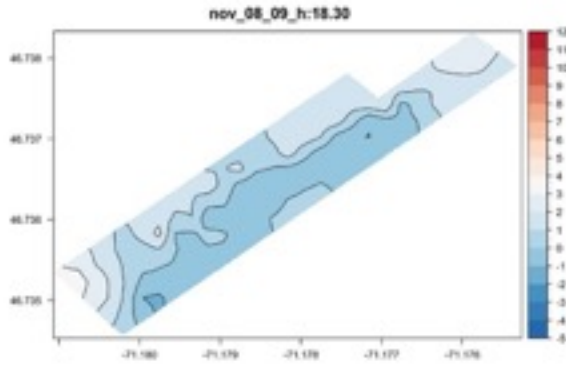
## **4. Résultats**

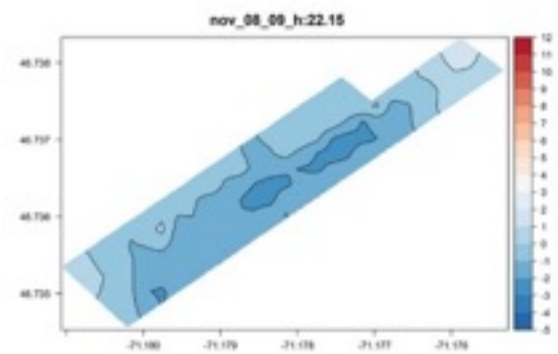
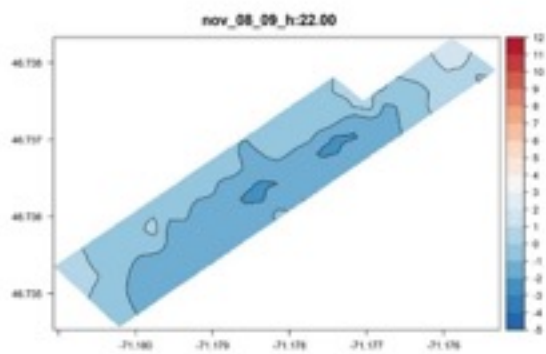
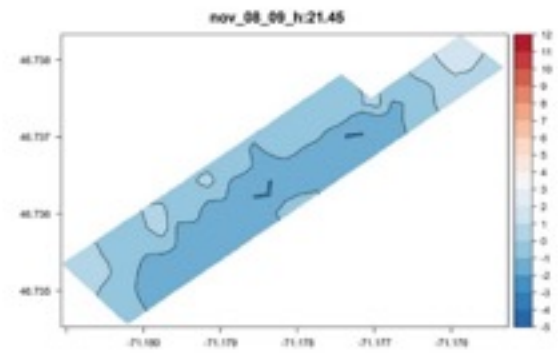
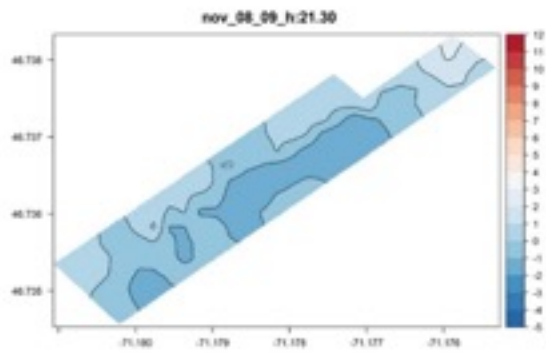
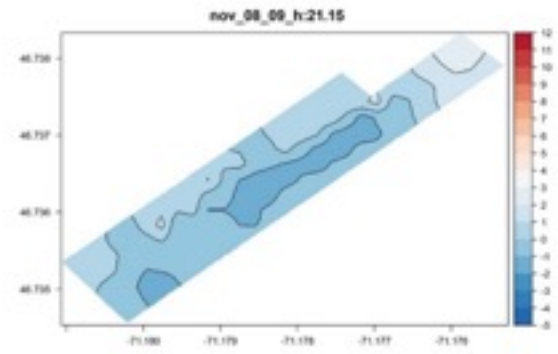
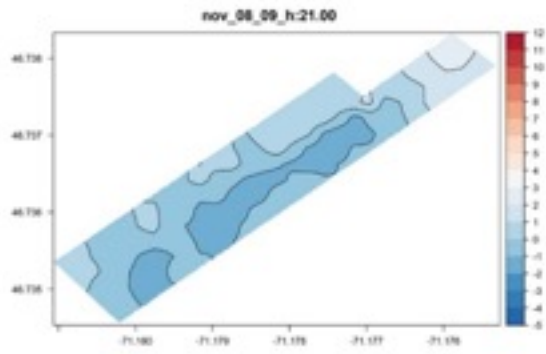
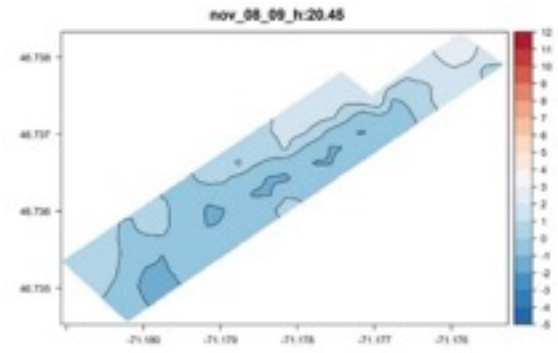
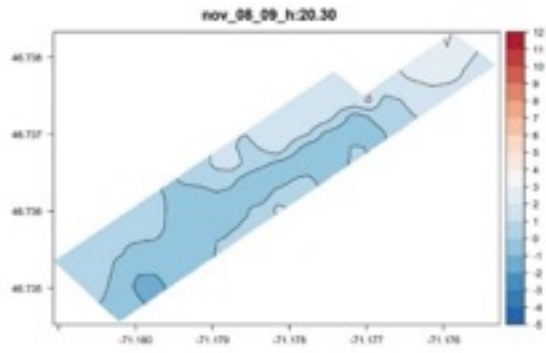
### **4.1. Modélisation de la variabilité spatiotemporelle de la température**

Les figures 2, 3 et 4 présentent les résultats de la modélisation et de l'identification des formations de gel selon la variabilité spatiotemporelle de la température pour les trois soirées analysées. Pour accompagner ce rapport, nous avons également produit trois vidéos (disponibles sur demande), un par soirée, pour illustrer clairement les mécanismes de formation du gel dans le vignoble.

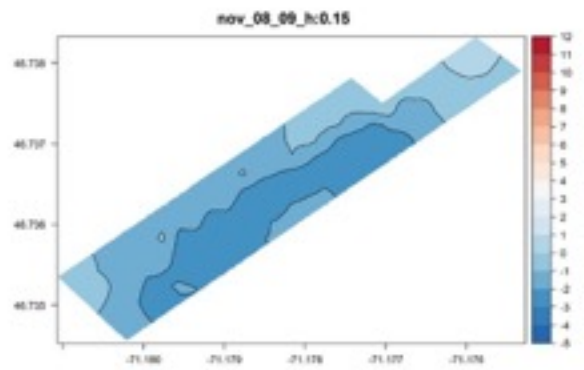
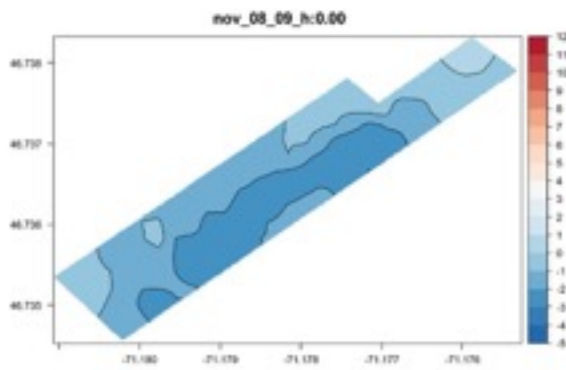
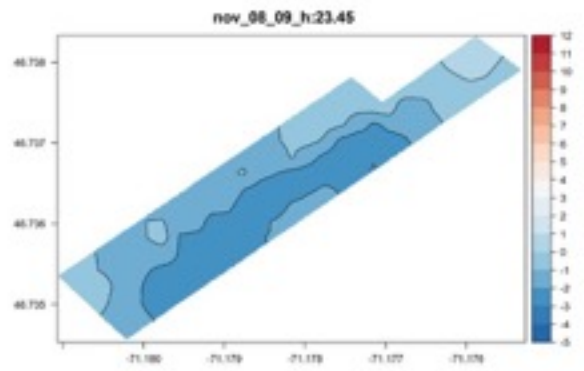
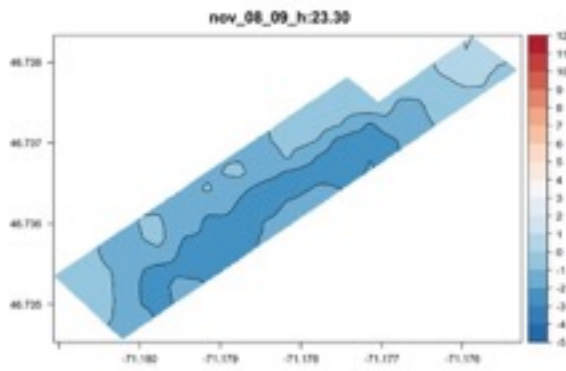
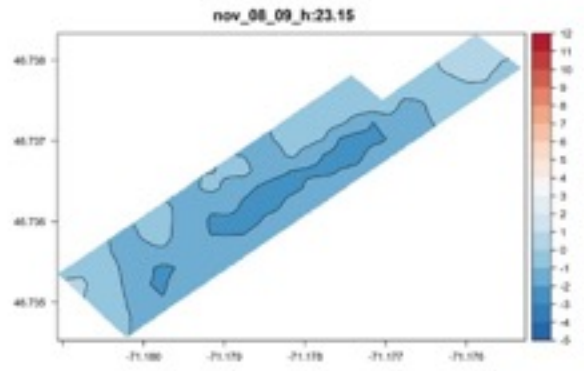
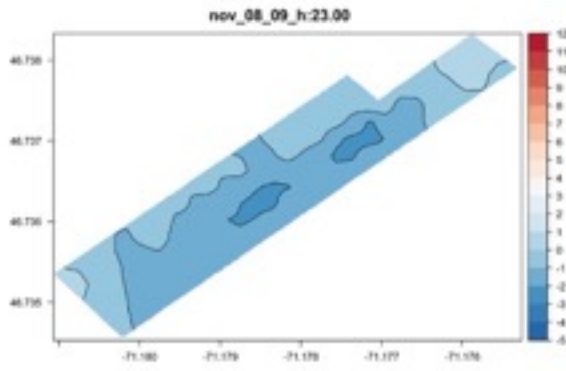
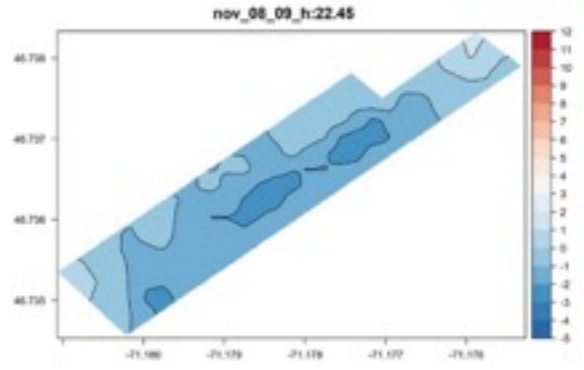
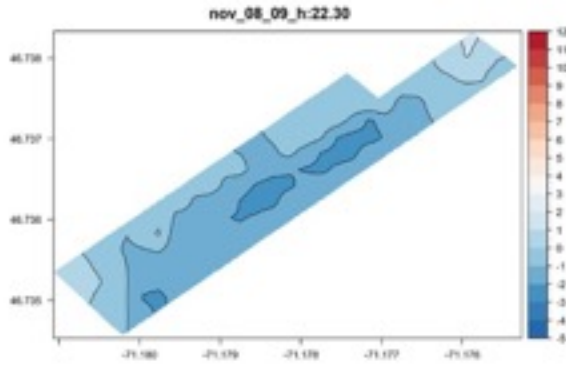
Figure 2. Formation du gel la nuit du 8-9 novembre 2021

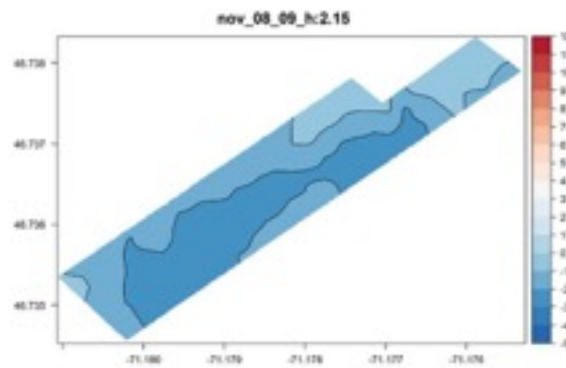
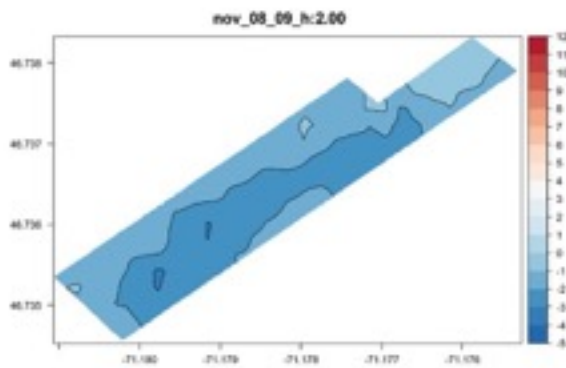
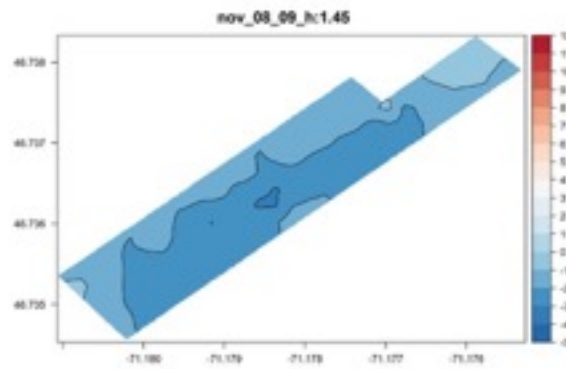
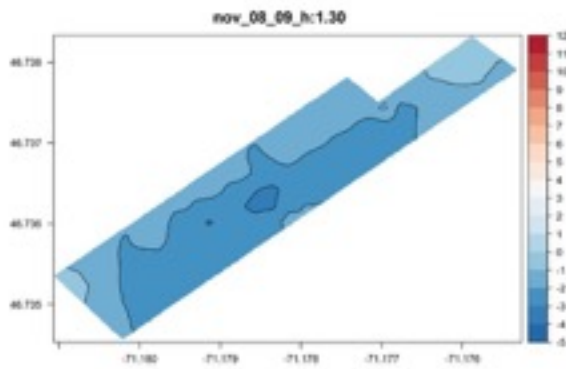
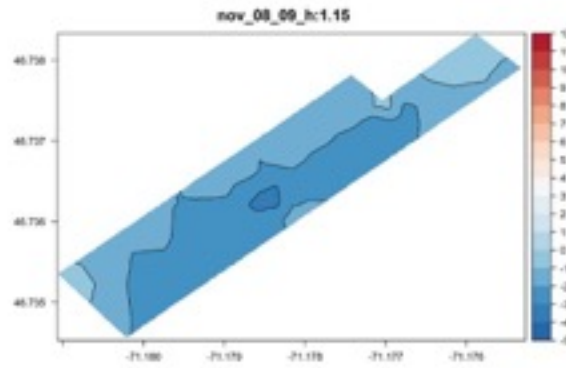
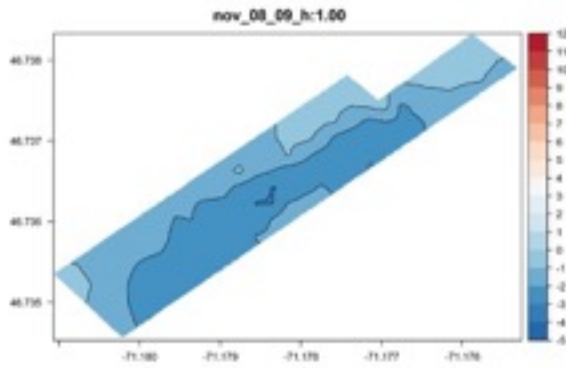
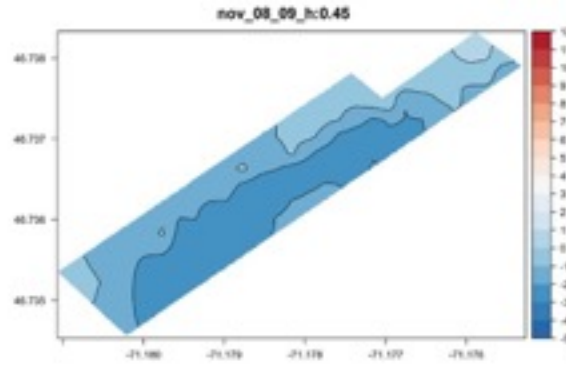
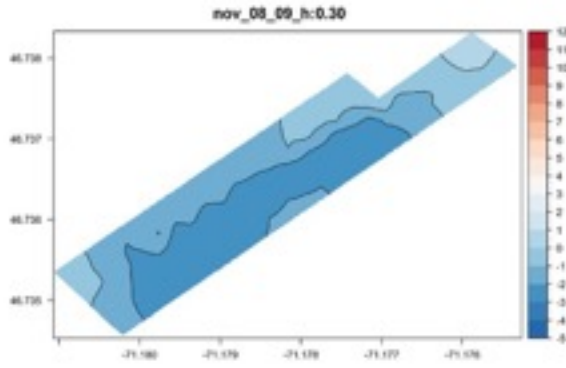


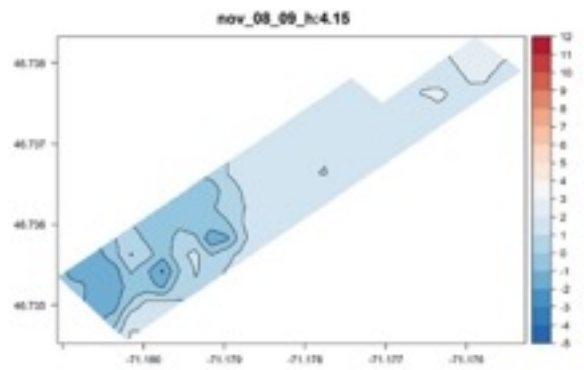
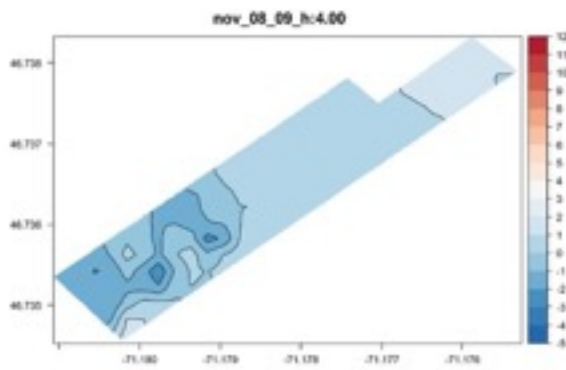
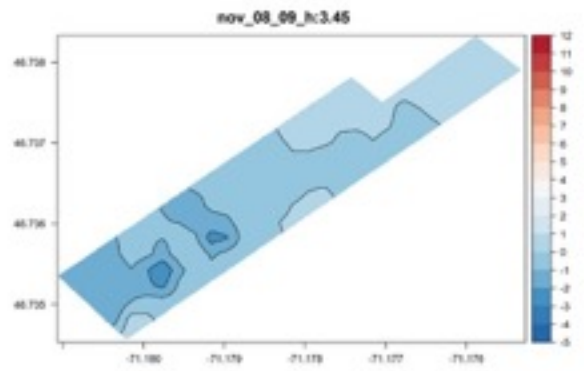
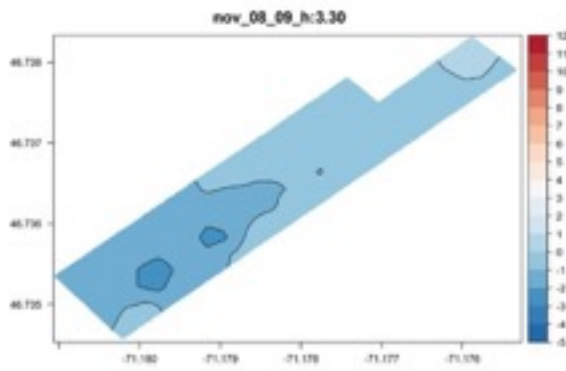
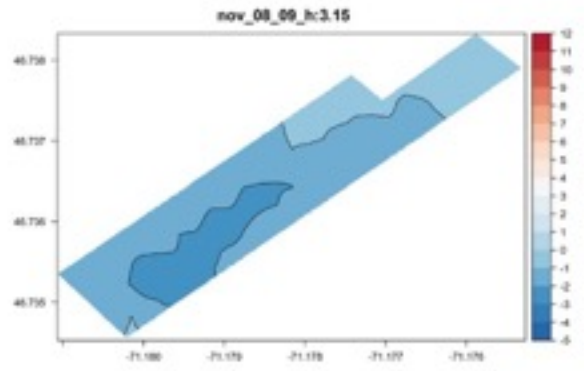
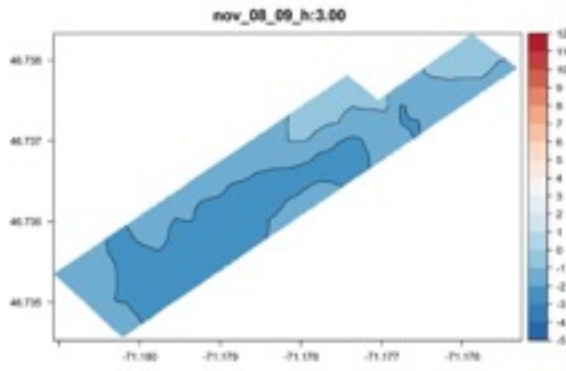
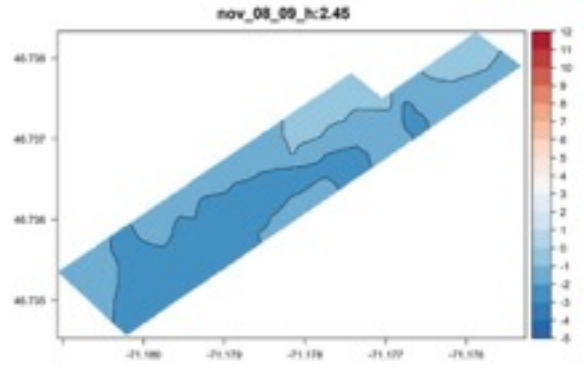
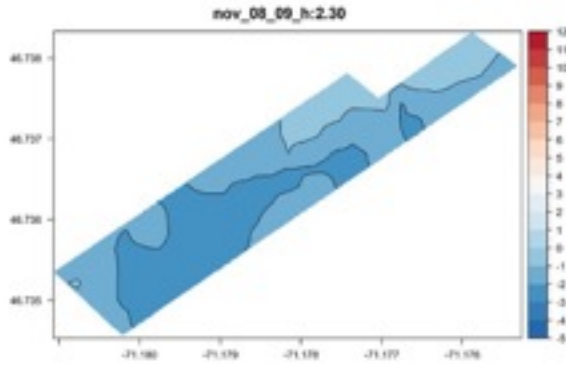


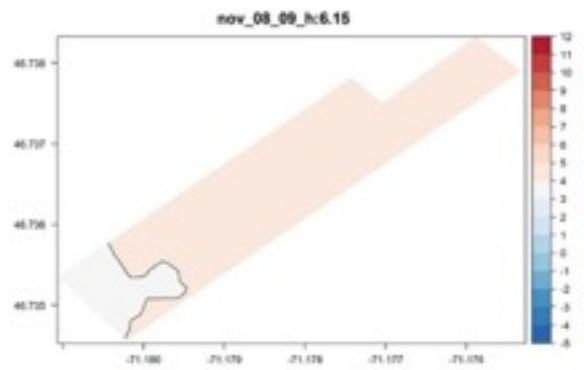
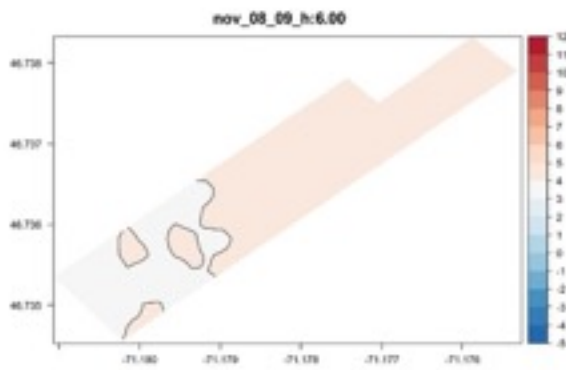
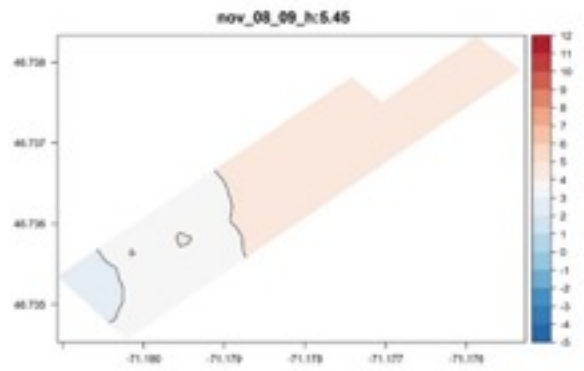
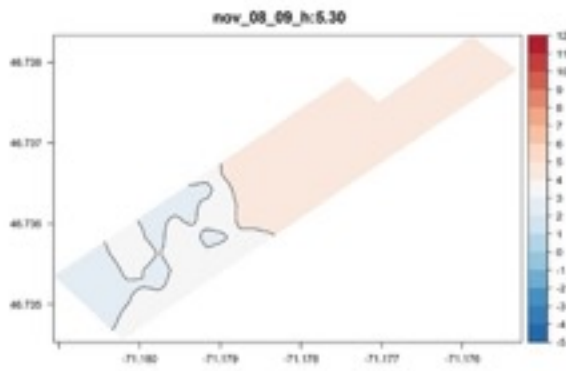
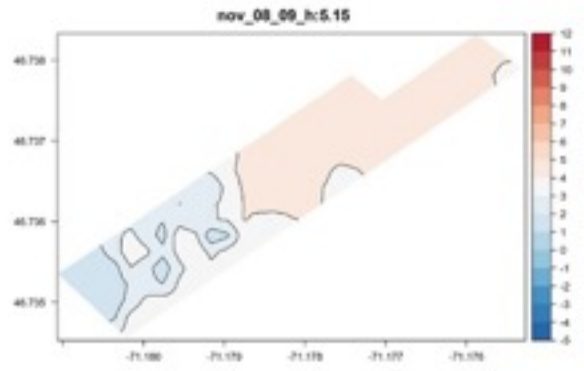
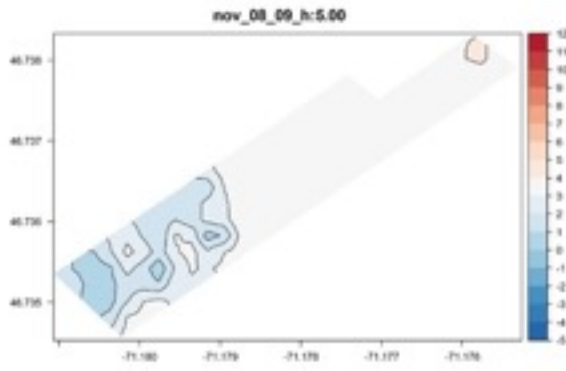
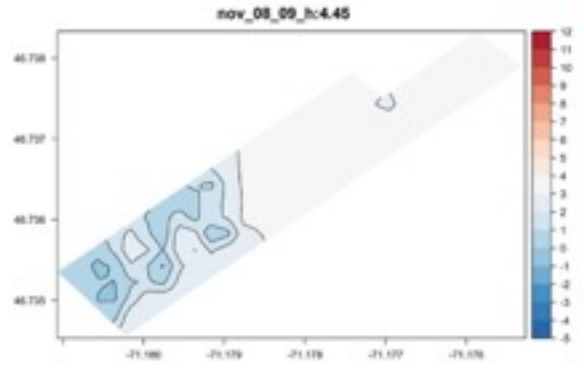
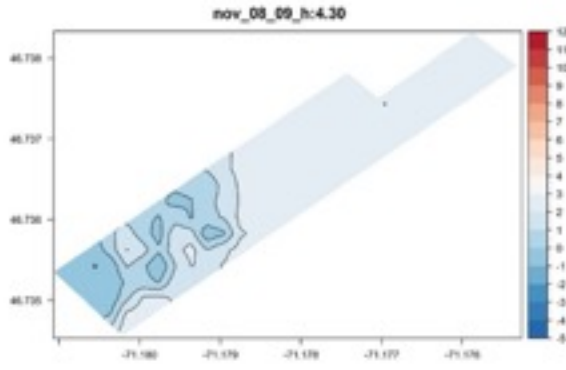












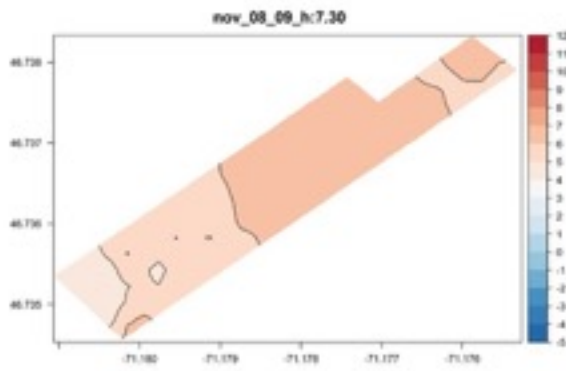
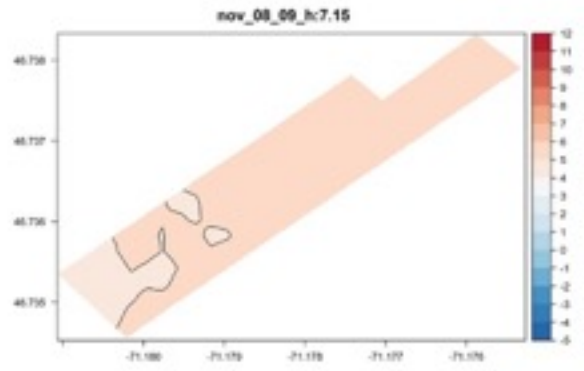
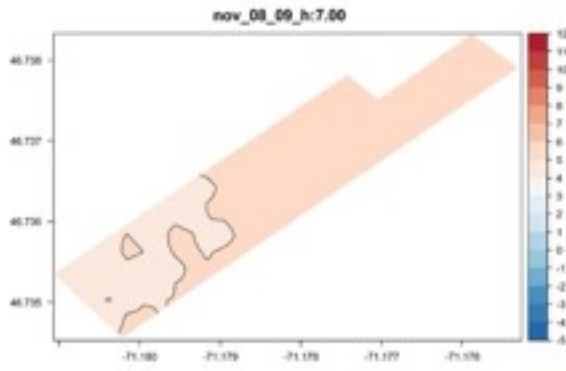
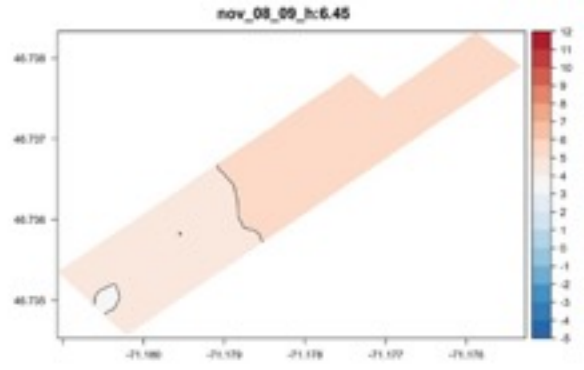
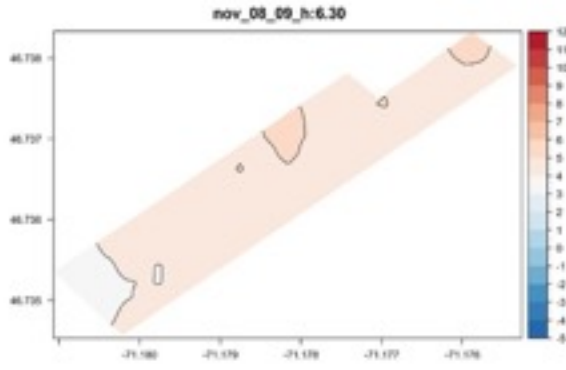
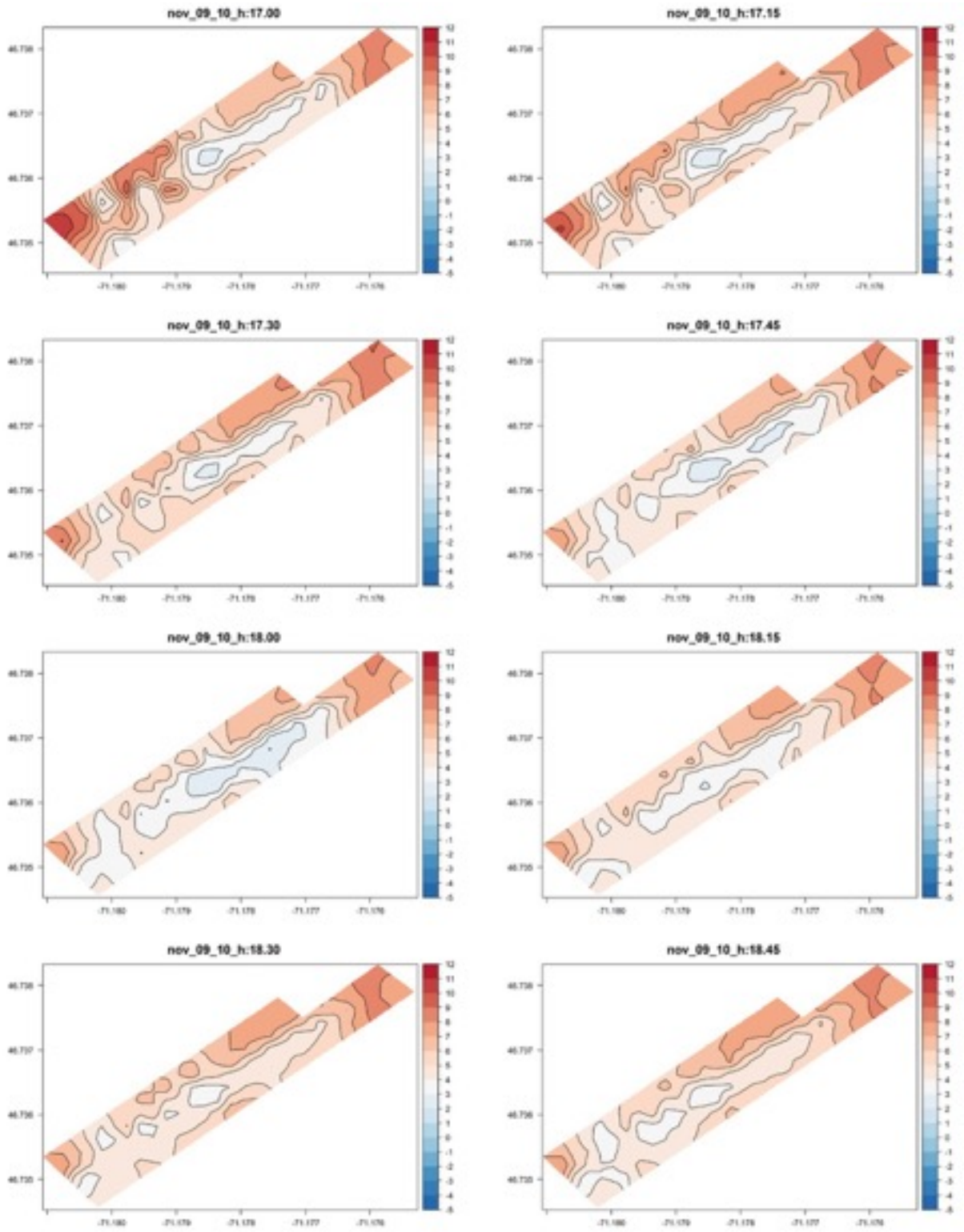
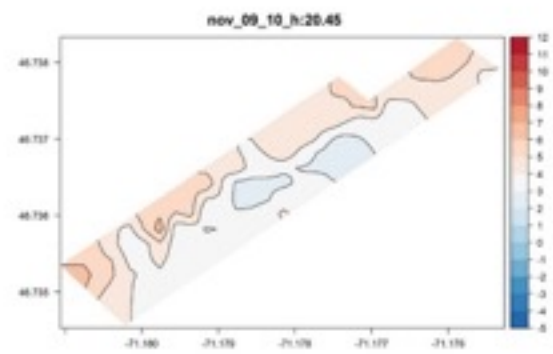
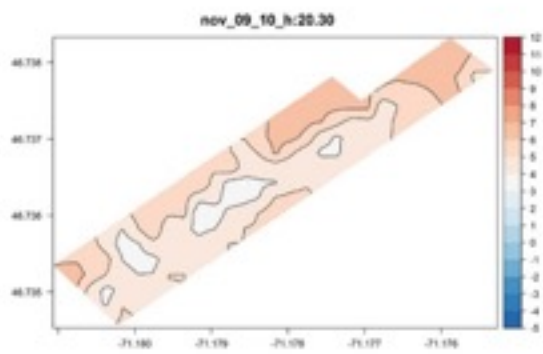
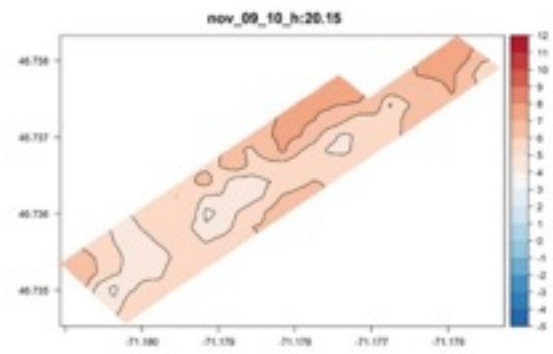
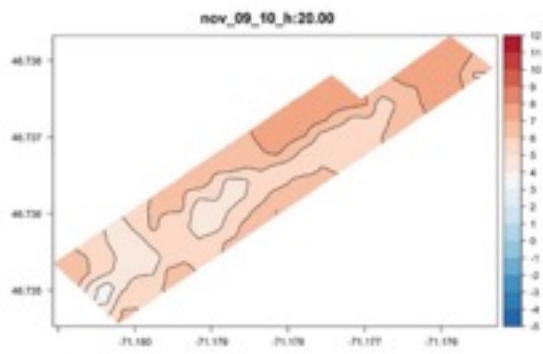
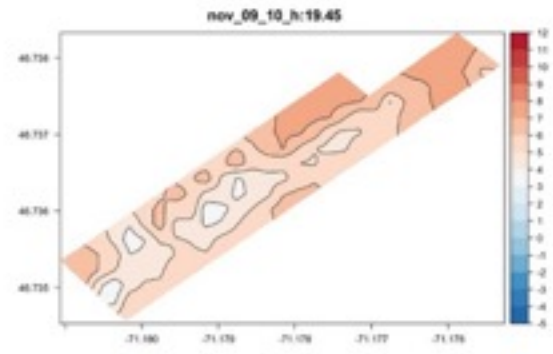
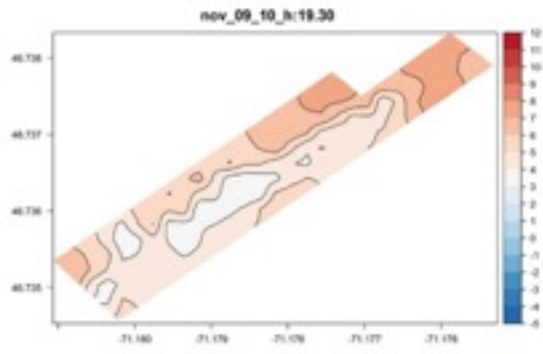
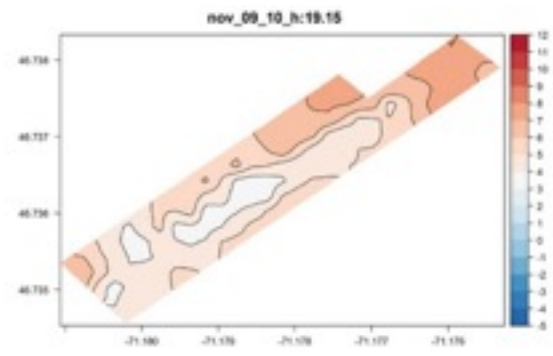
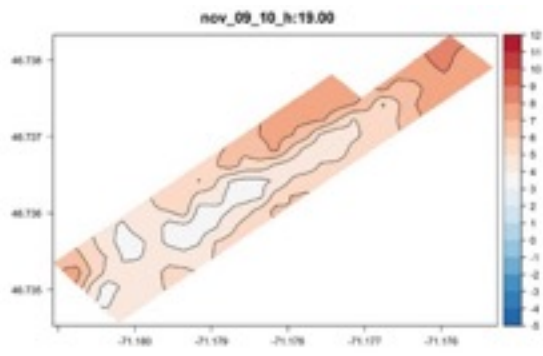
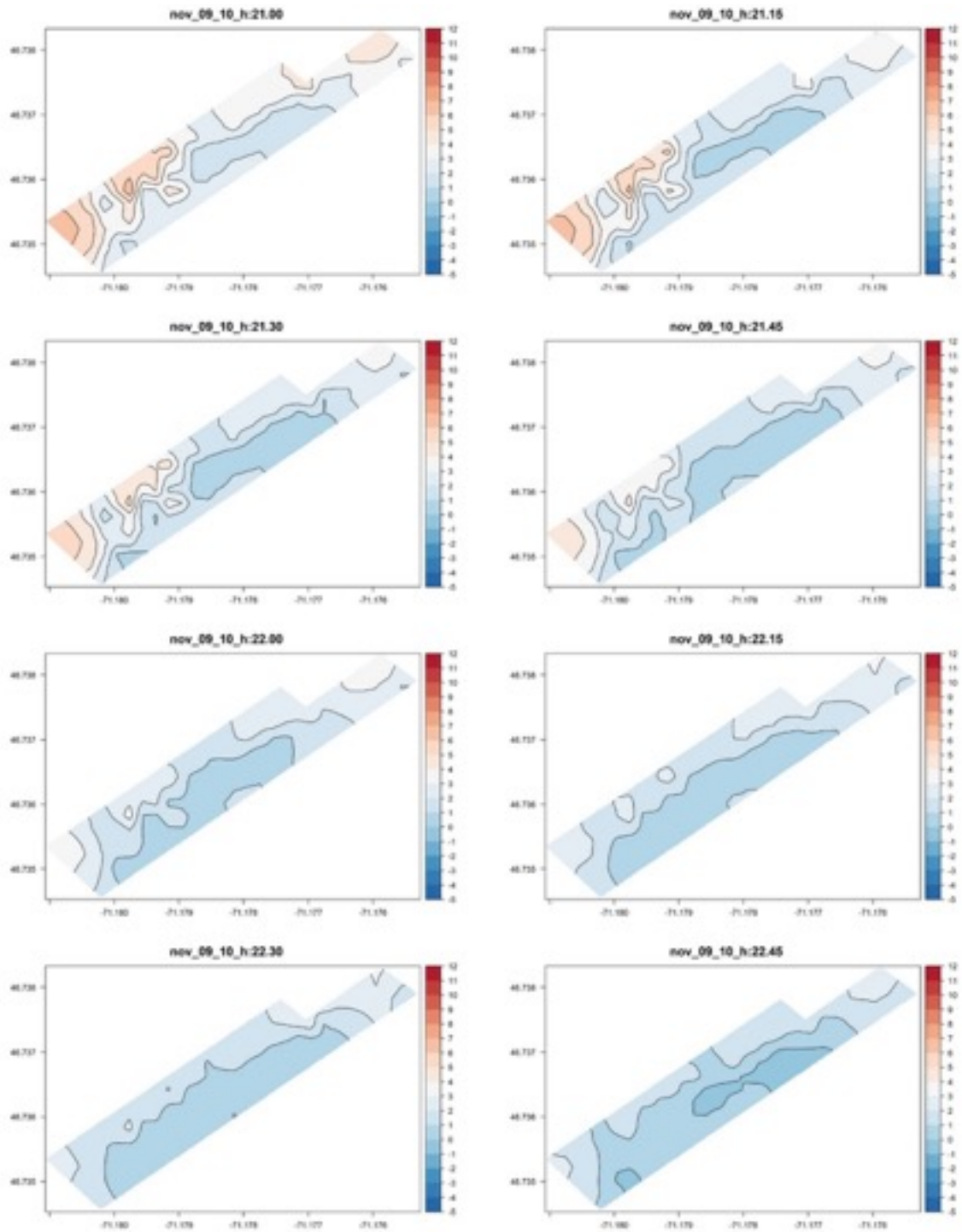


Figure 3. Formation du gel la nuit du 9-10 novembre 2021

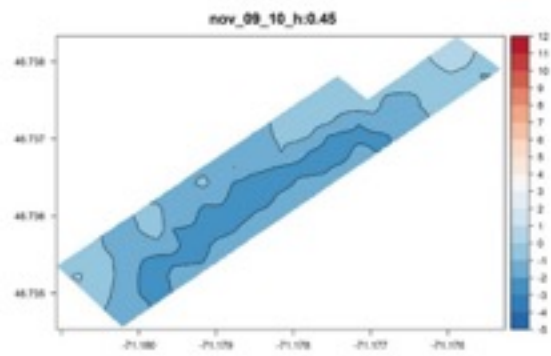
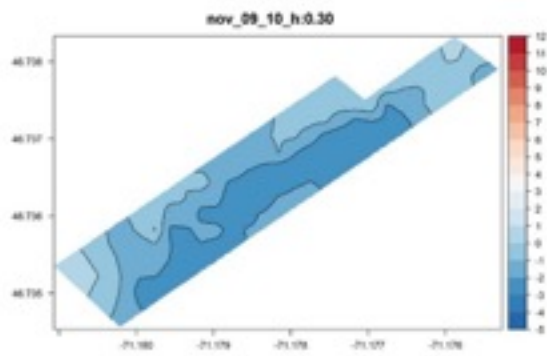
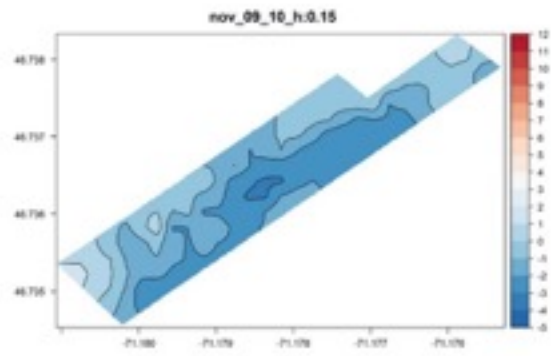
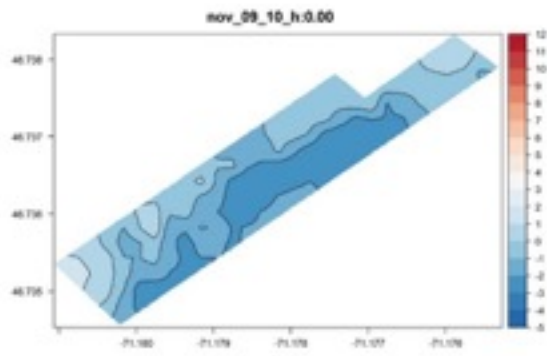
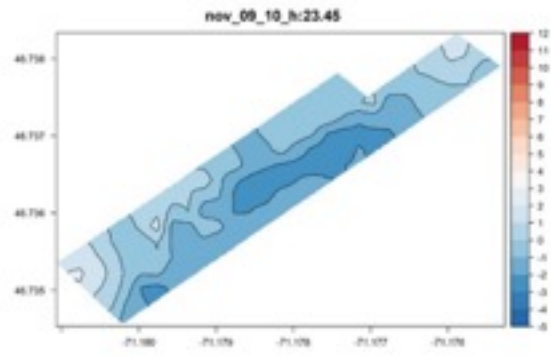
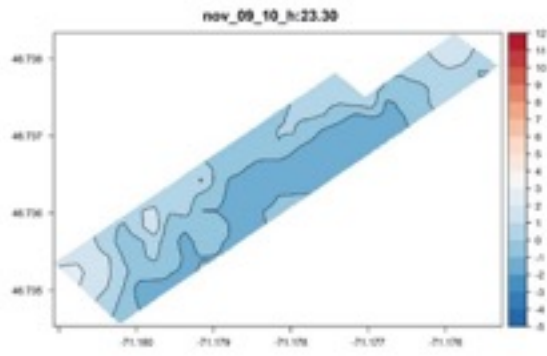
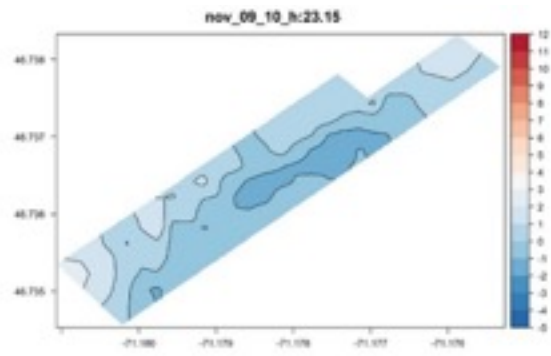
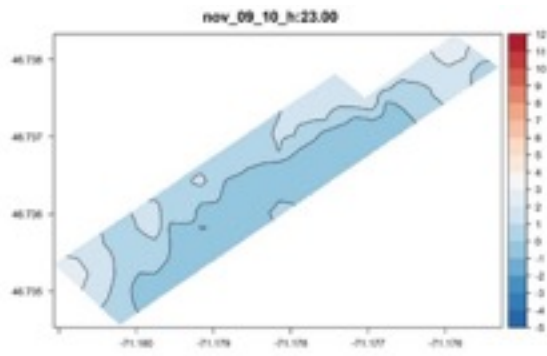


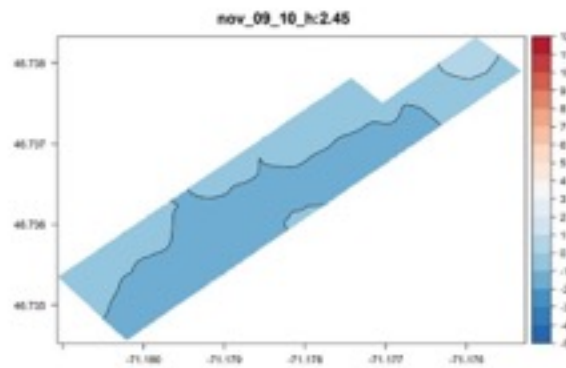
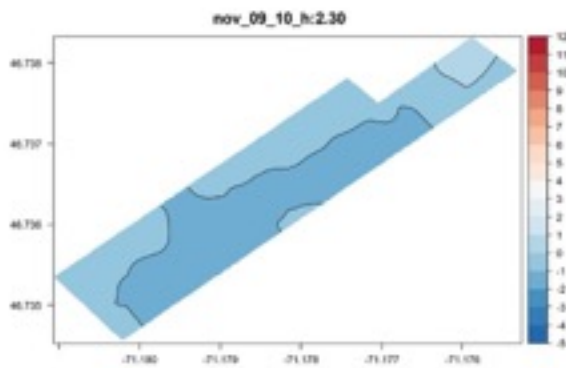
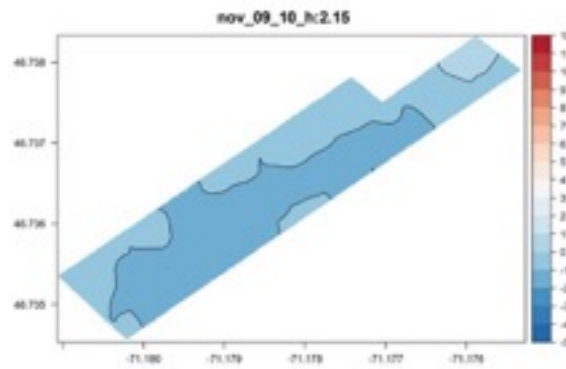
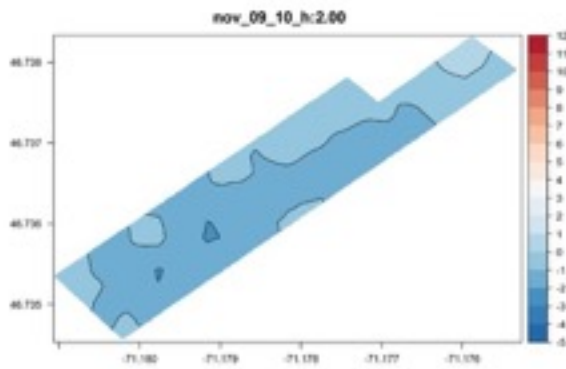
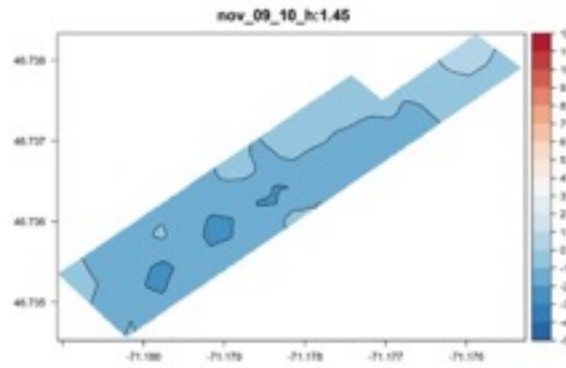
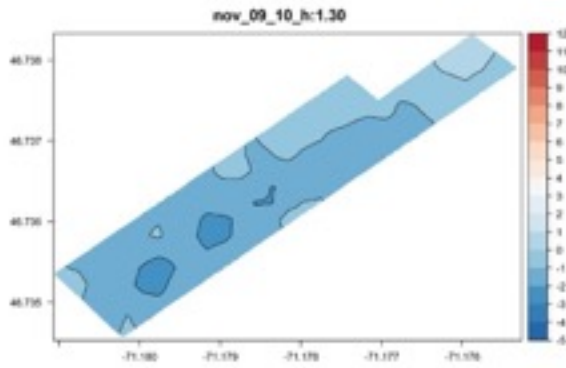
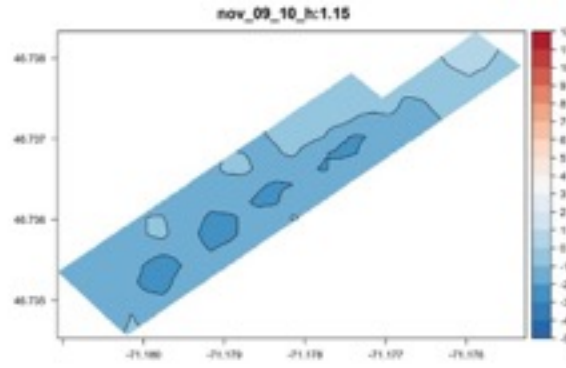
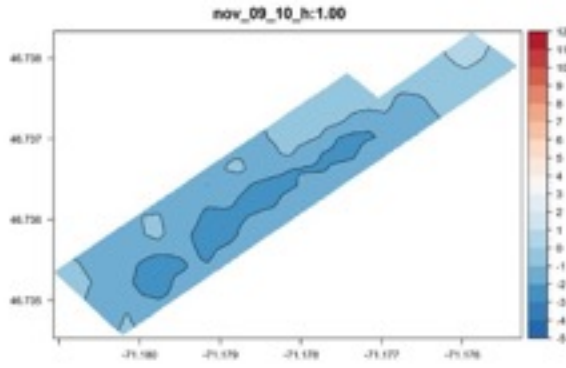


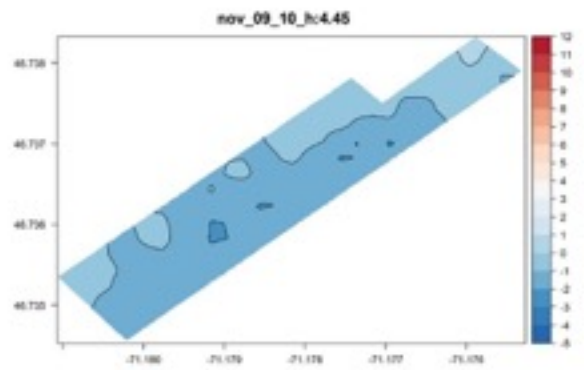
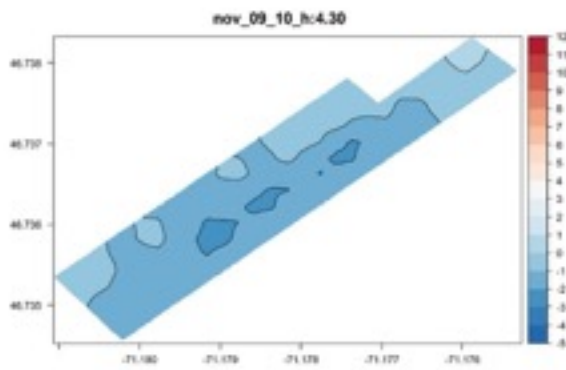
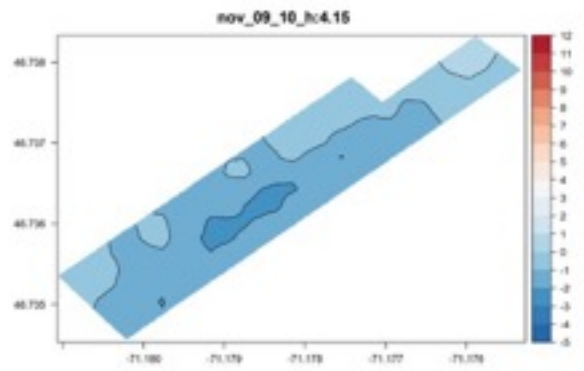
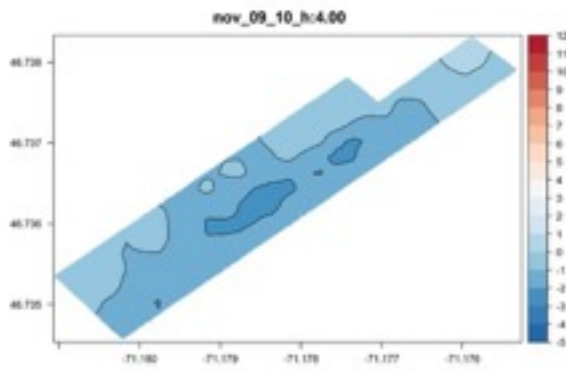
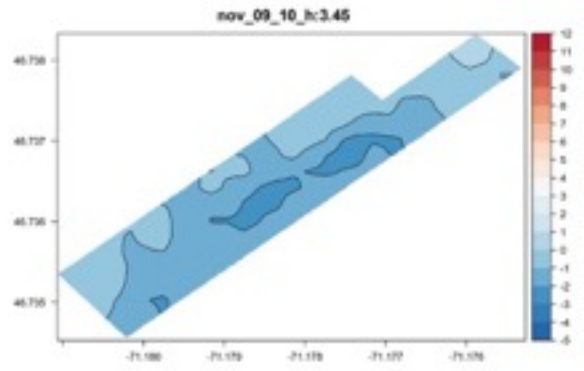
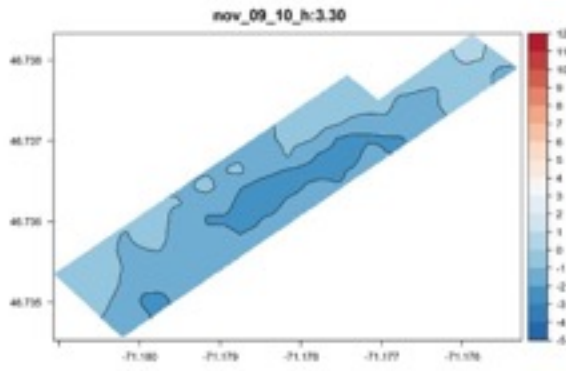
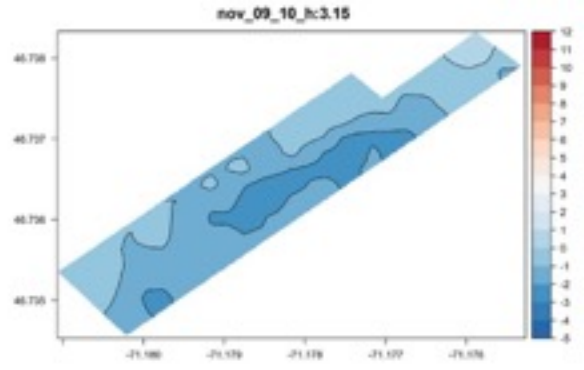
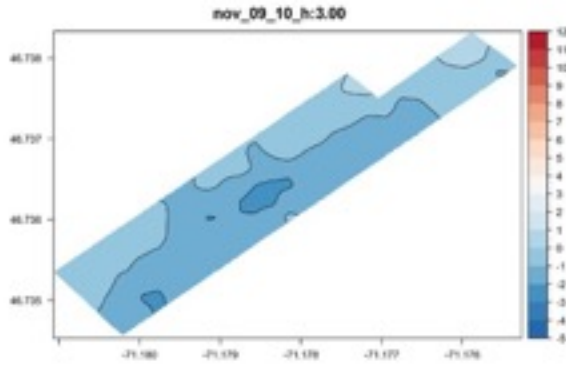


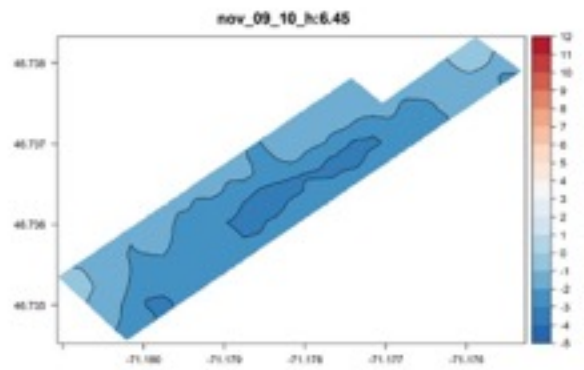
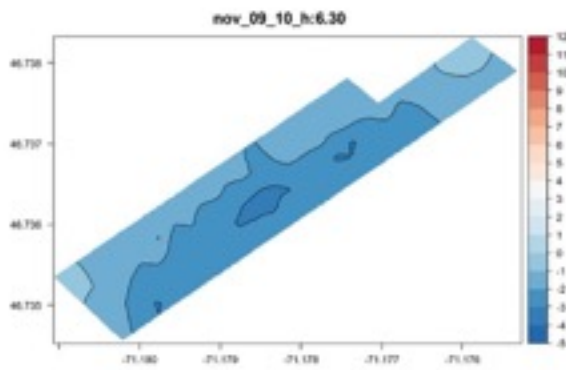
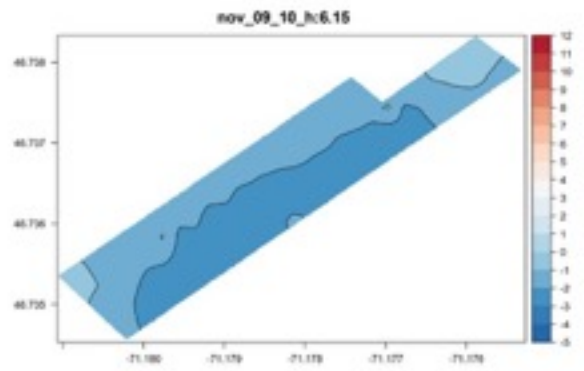
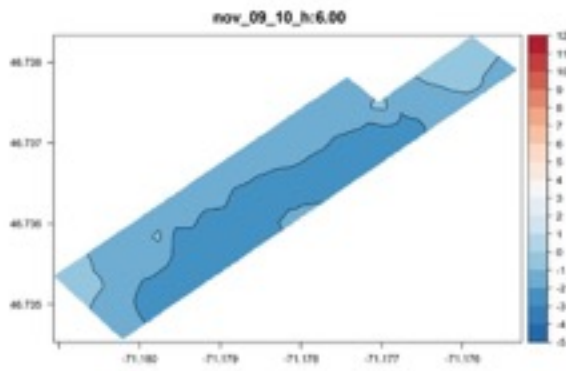
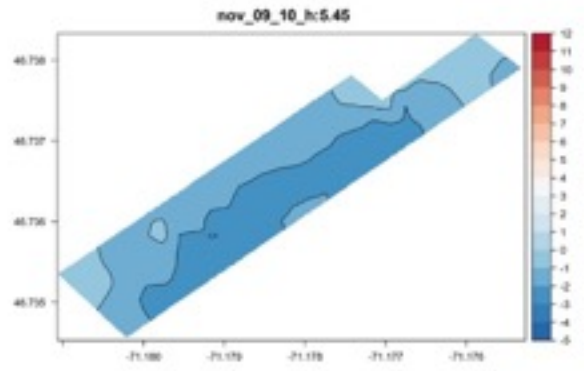
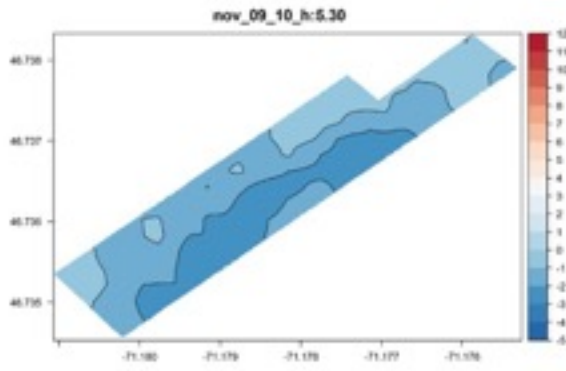
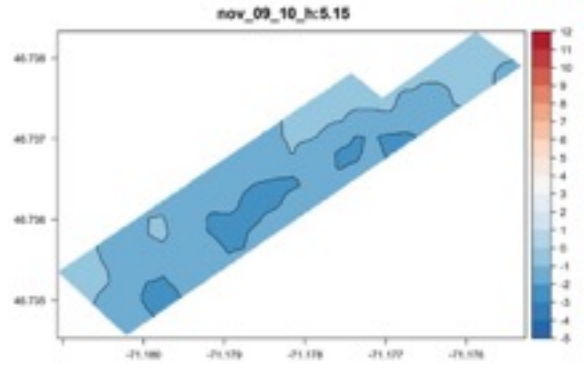
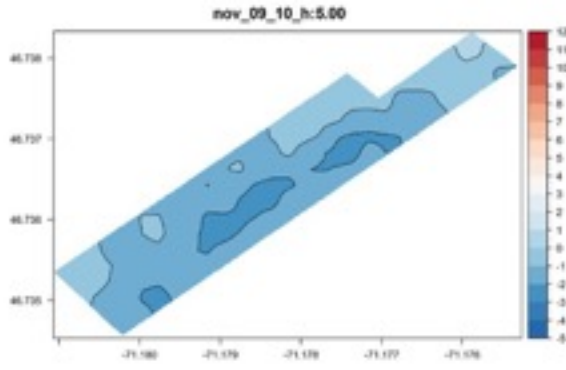
f











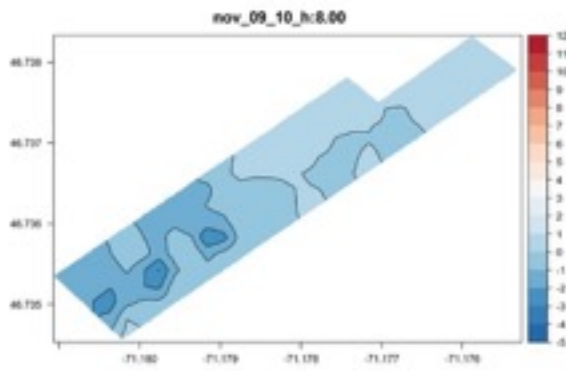
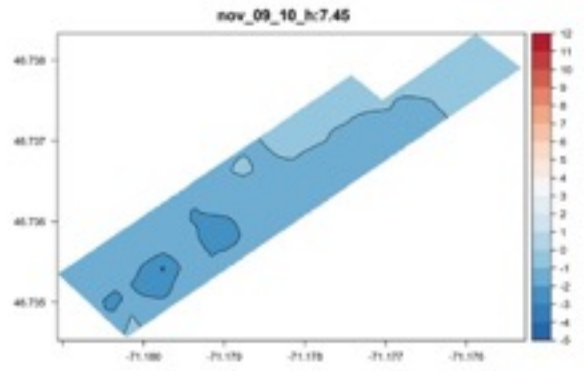
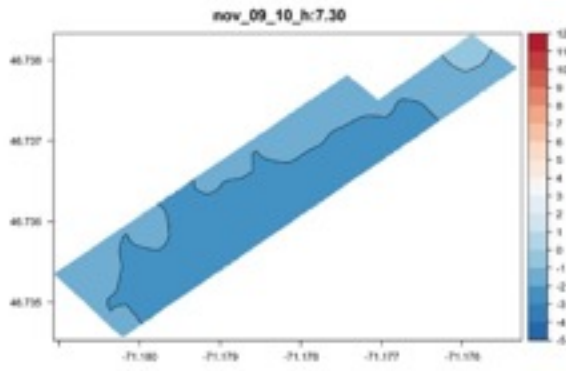
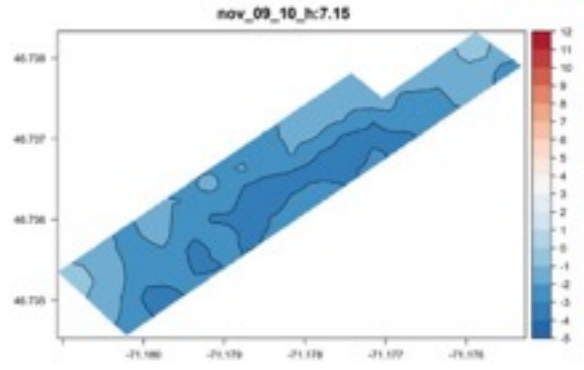
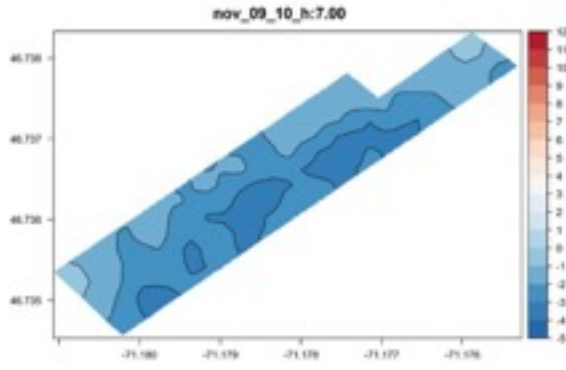
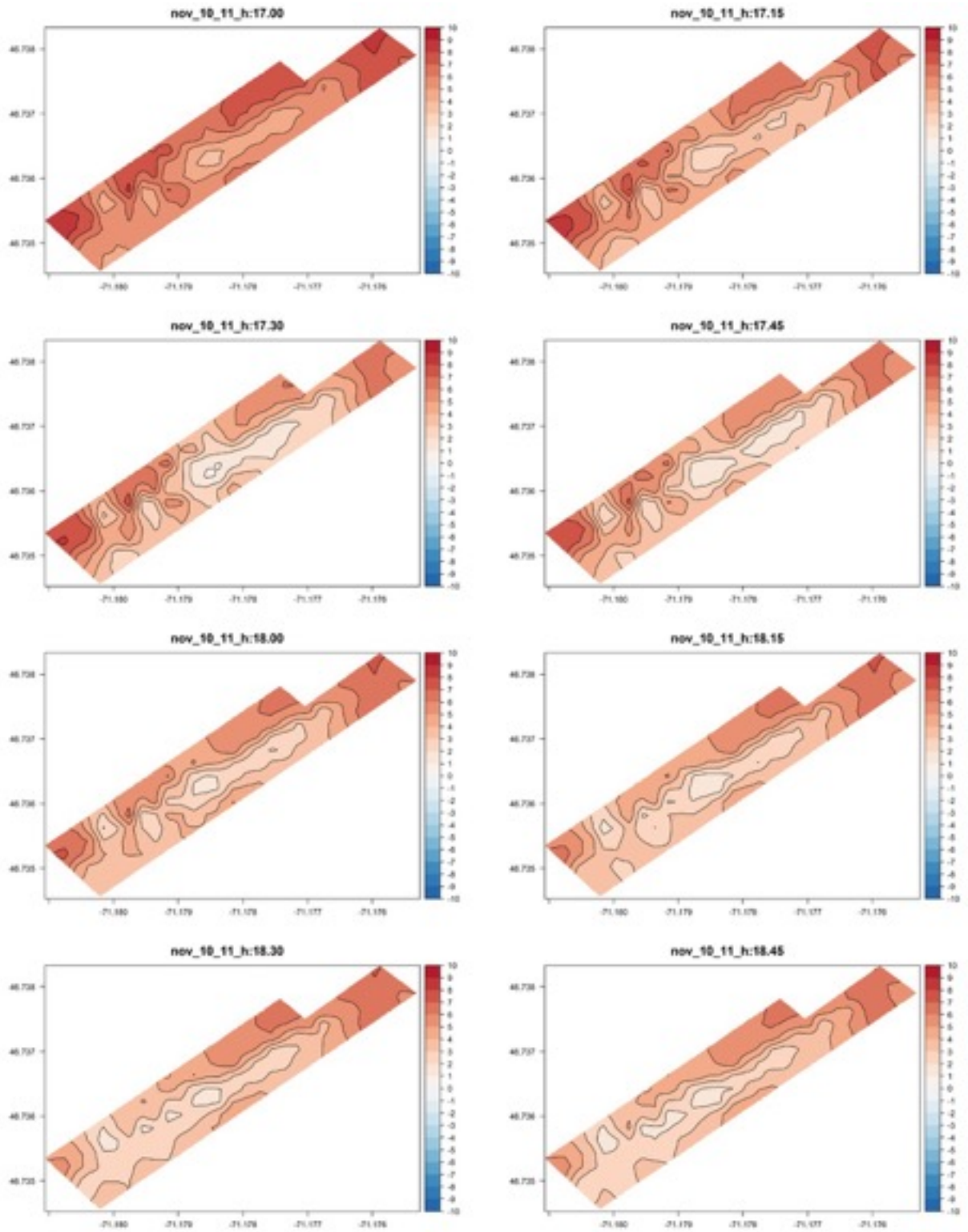
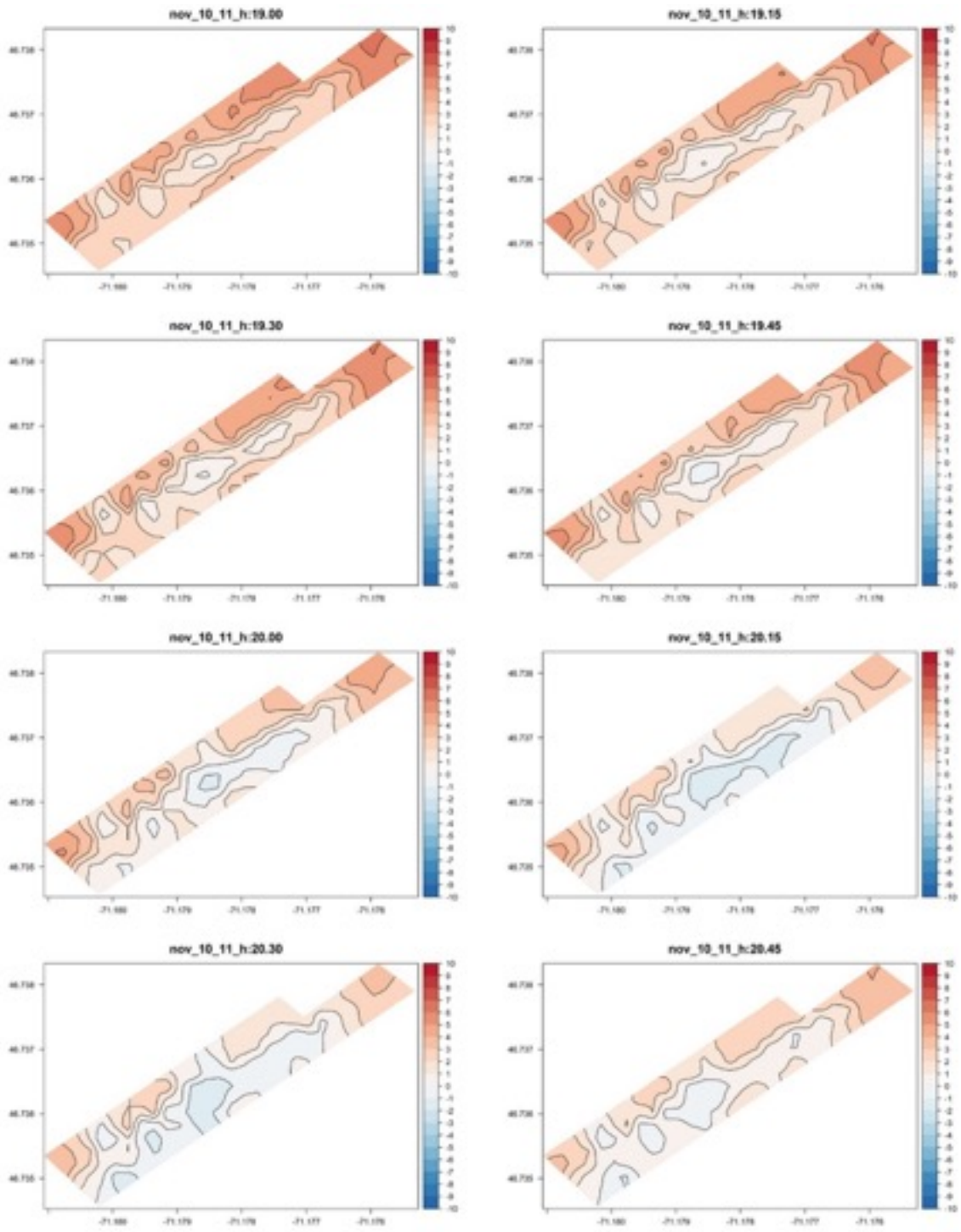
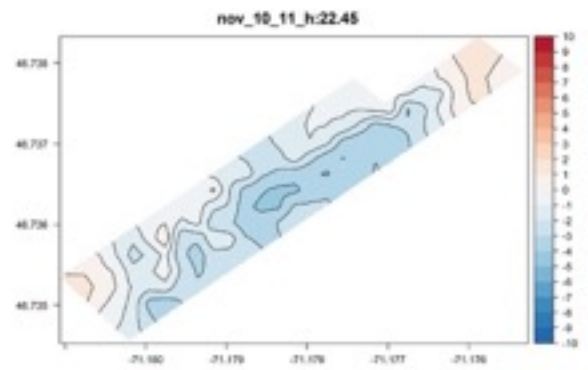
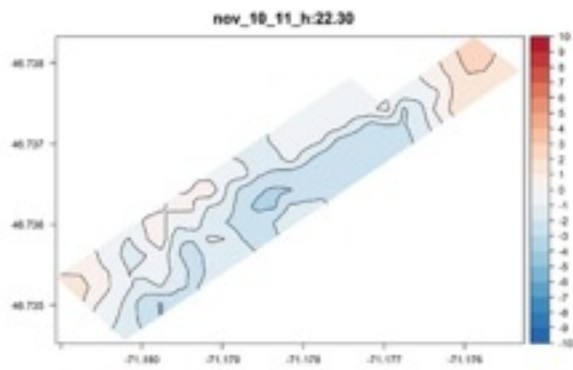
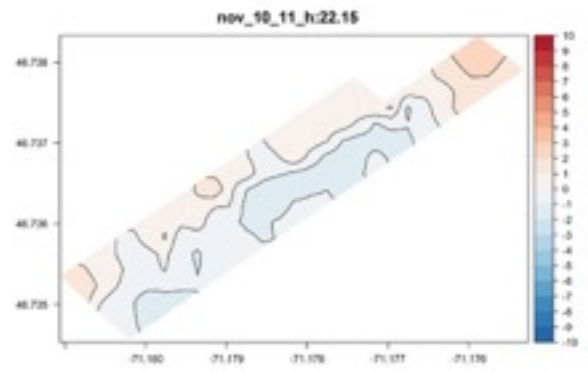
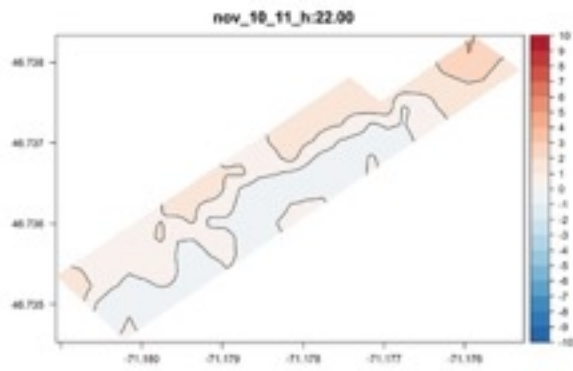
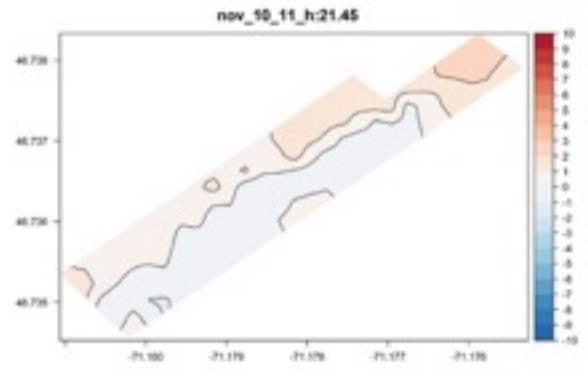
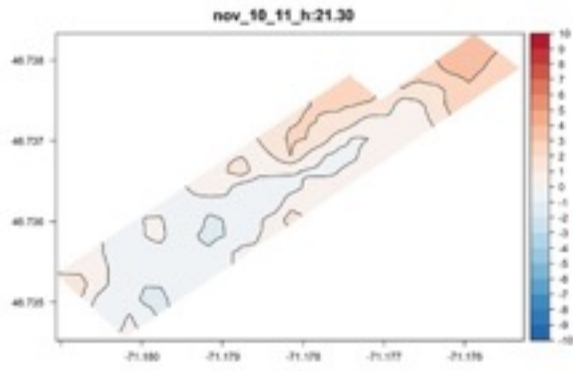
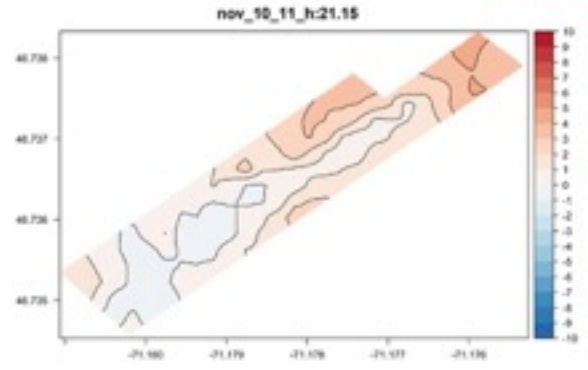
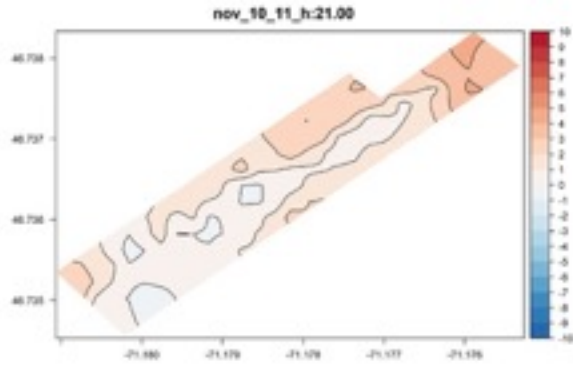


Figure 4. Formation du gel la nuit du 10-11 novembre 2021

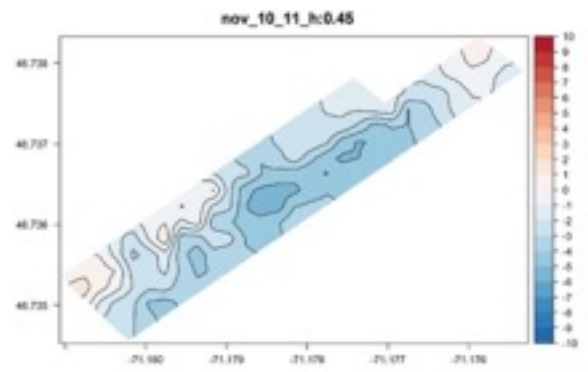
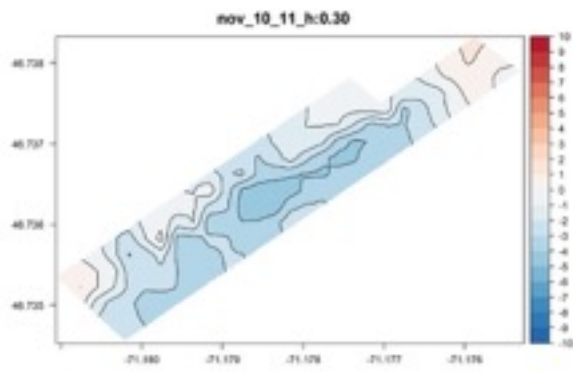
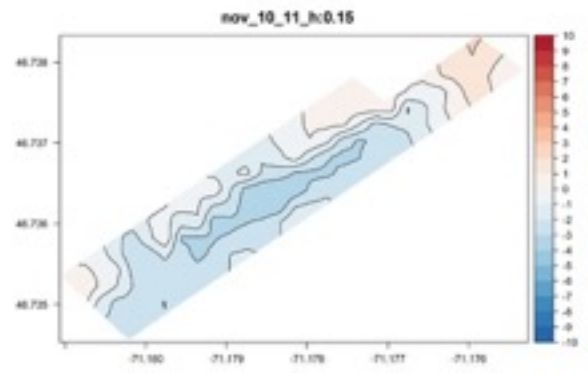
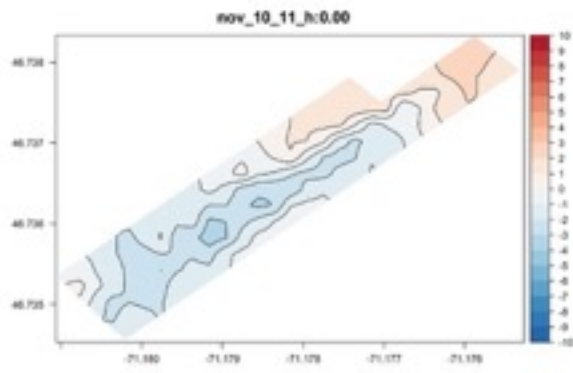
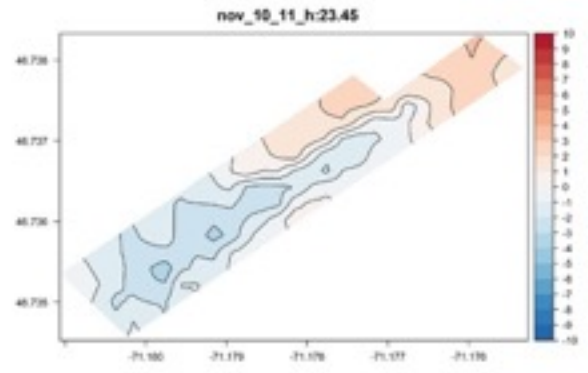
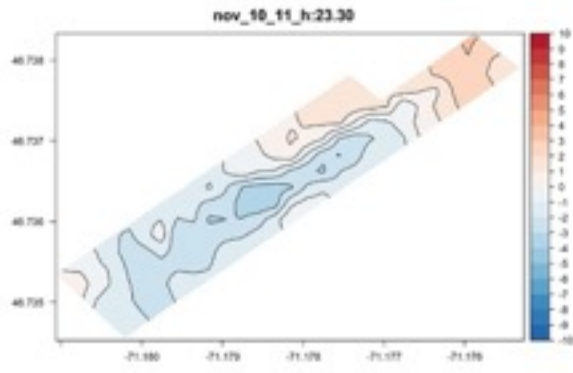
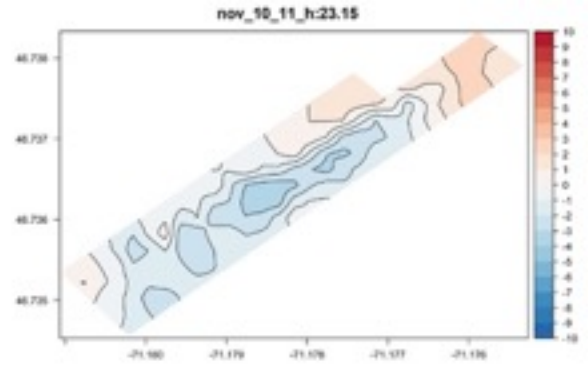
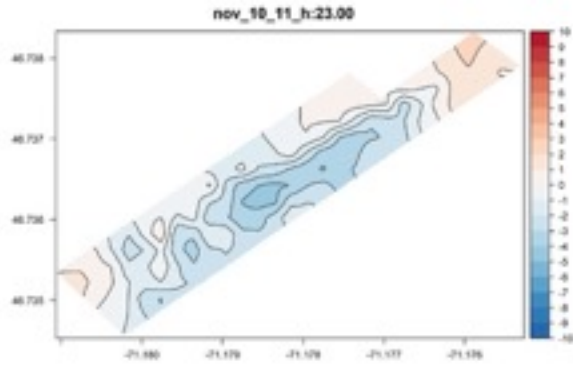


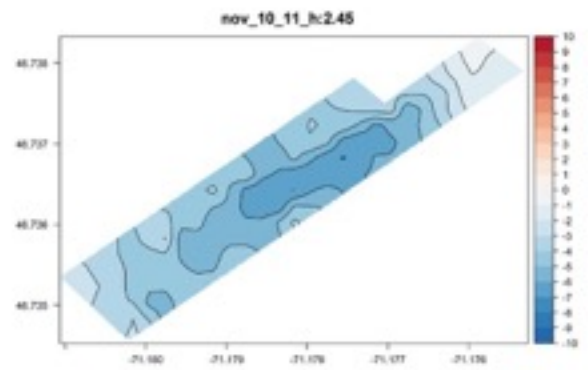
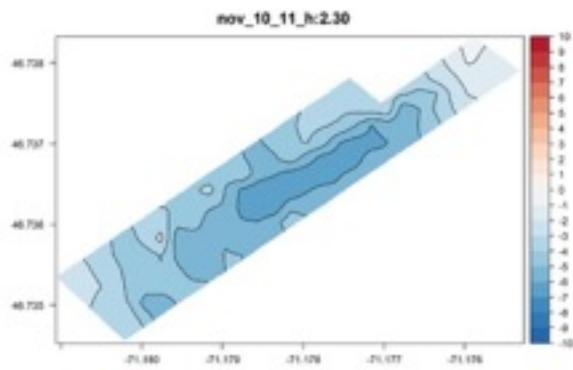
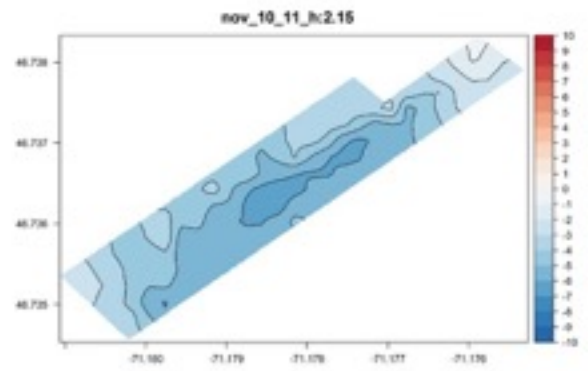
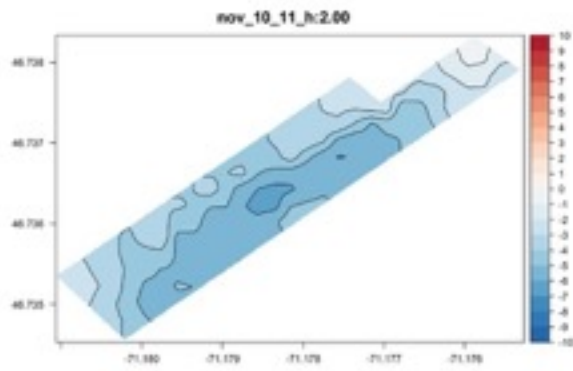
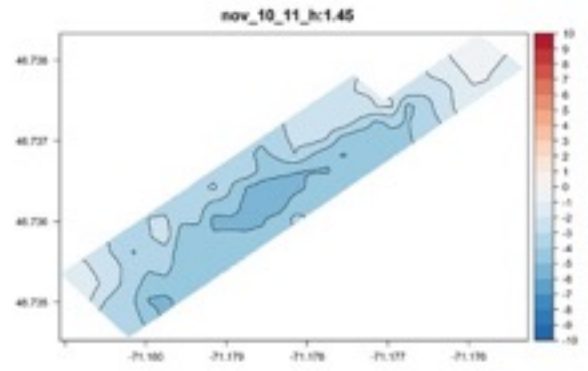
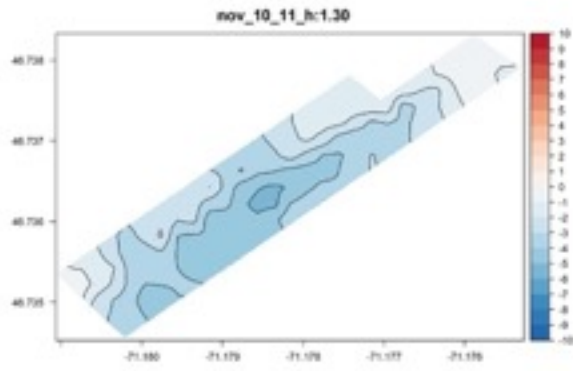
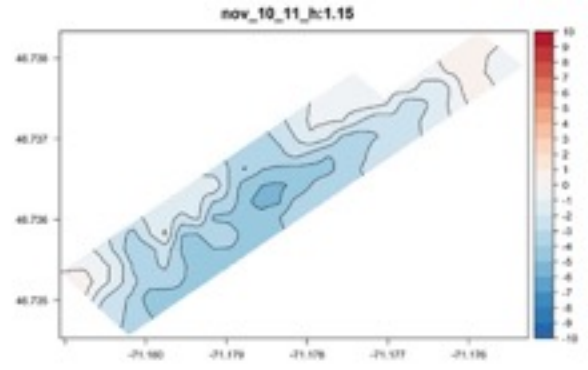
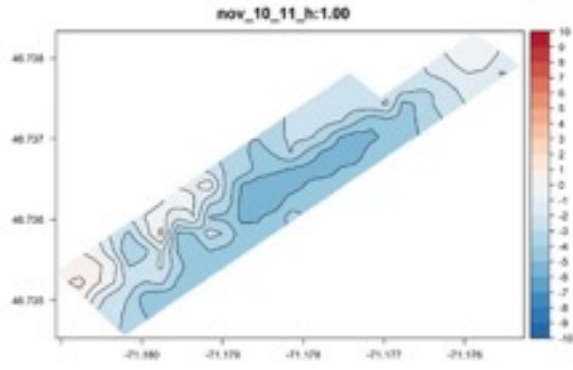


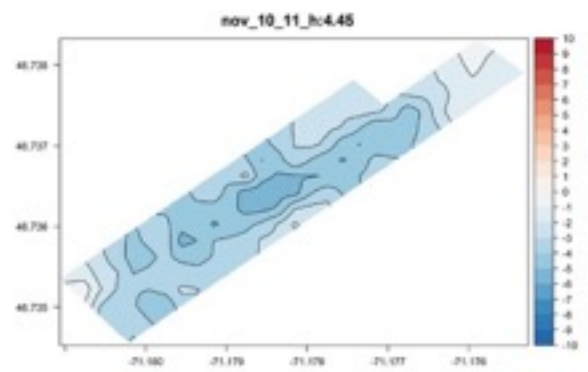
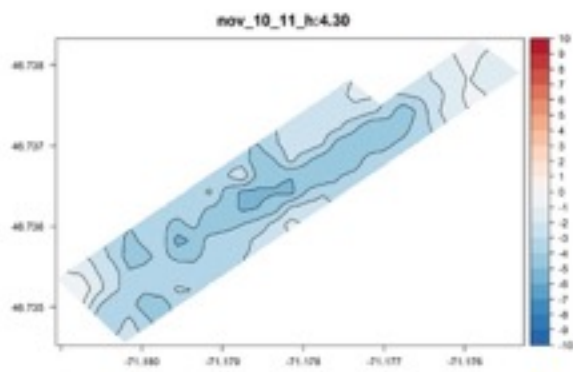
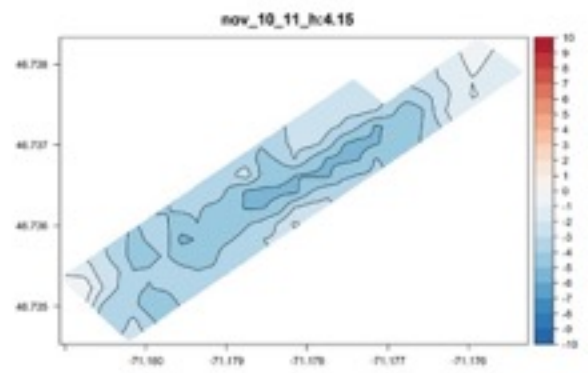
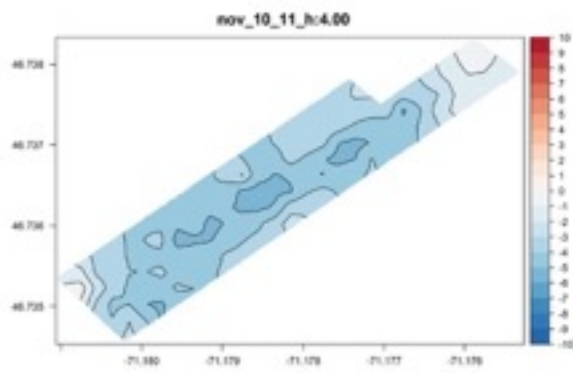
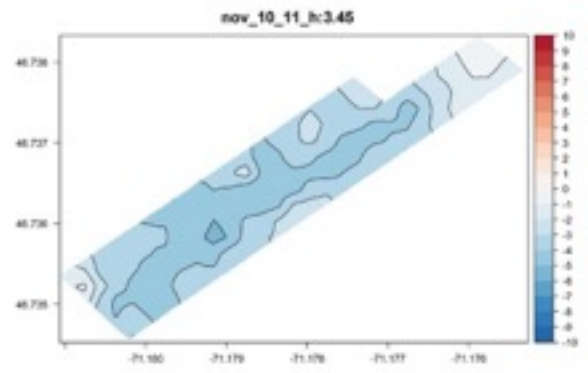
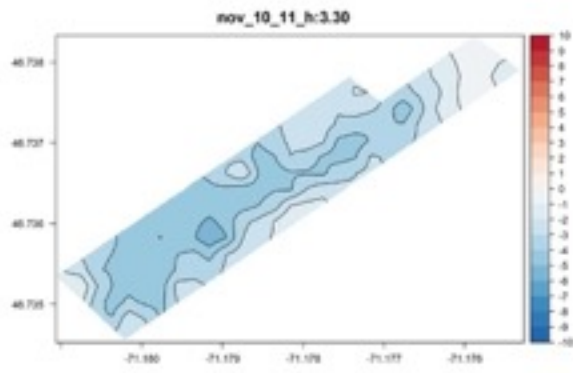
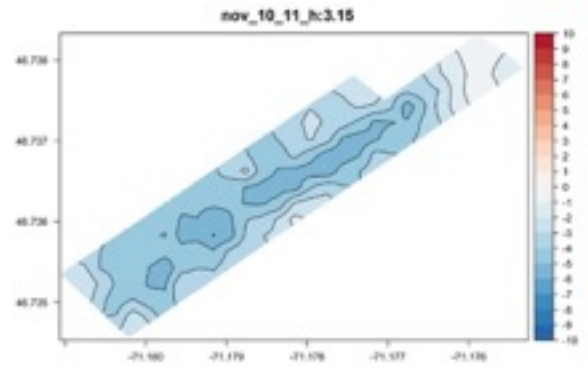
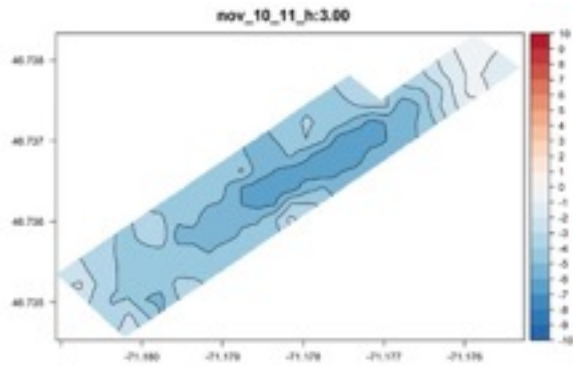
f

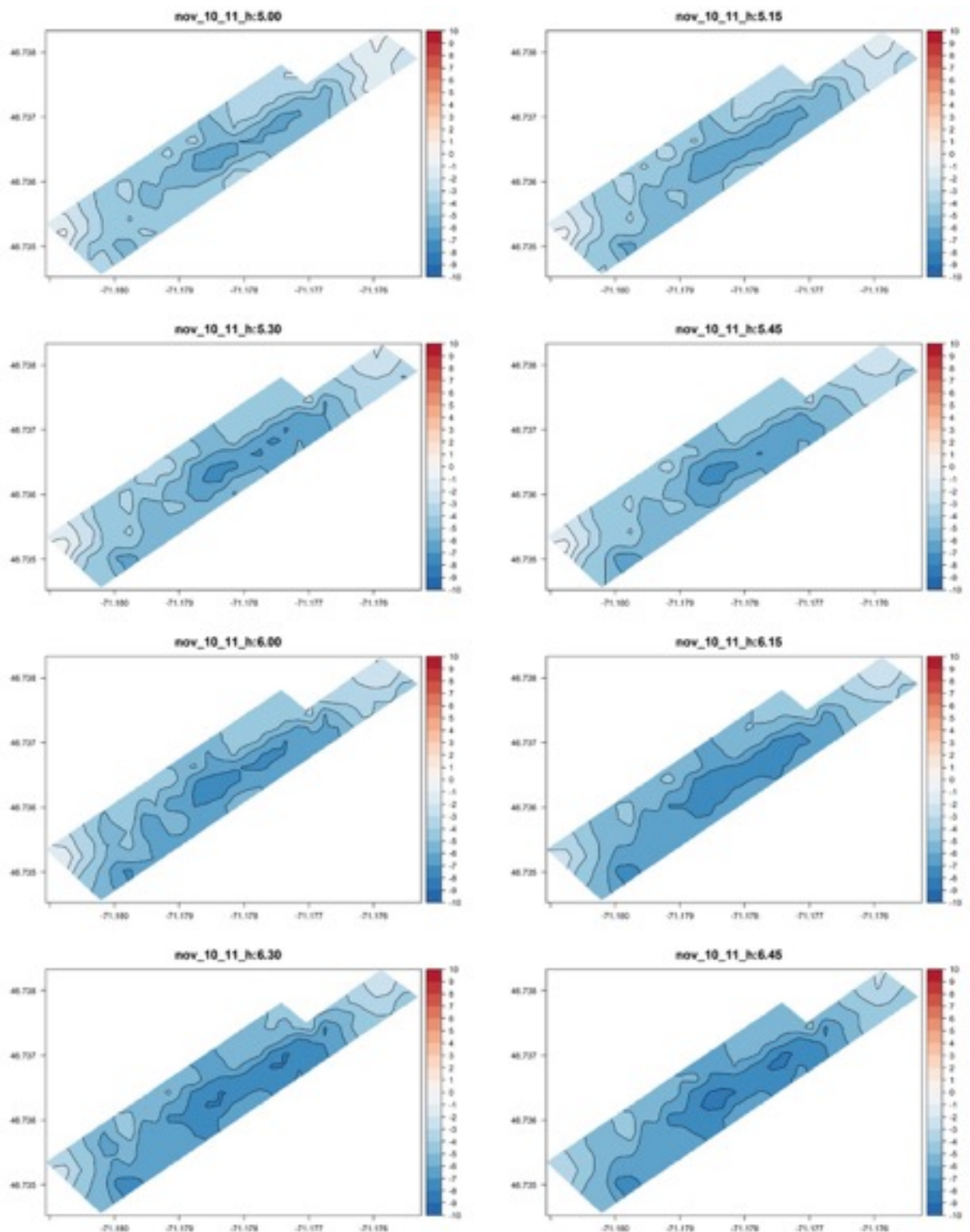












La figure 5 schématise la distribution de l'air froid dans le vignoble selon la synthèse des résultats. Le refroidissement se développe d'abord dans les zones centrales (figure 5b), puis sur le côté

sud-est du vignoble (figure 5c). Les observations menées sur le terrain nous montrent que plusieurs de ces zones comptent des dépressions (figure 6), qui sont favorables à l'accumulation et à la stagnation d'air froid (et de l'eau). Finalement, l'air froid pénètre dans le côté nord-ouest (figure 5c, d et f).

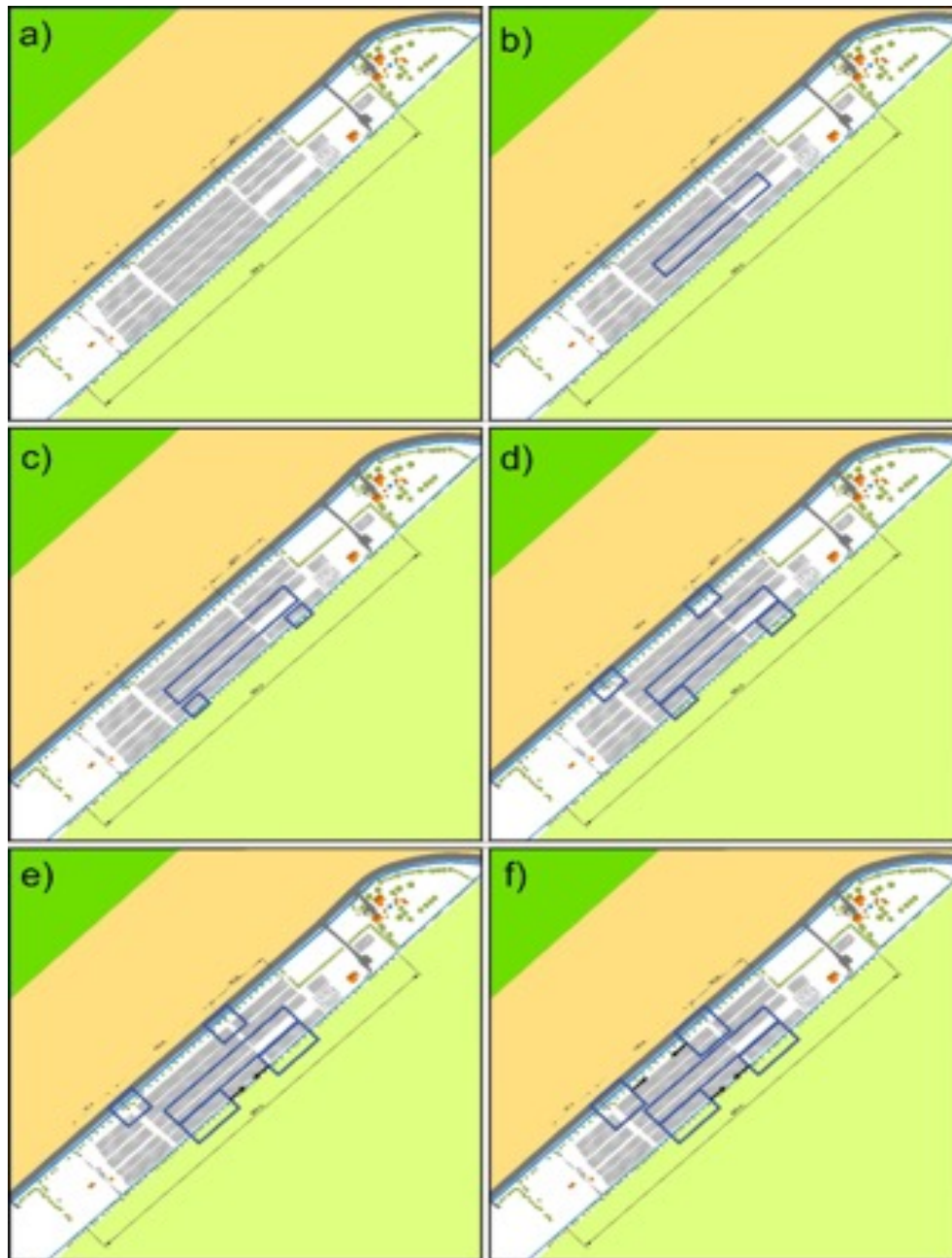


Figure 5. Schéma de la distribution de l'air froid dans le vignoble selon la synthèse des résultats.



Figure 6). Les observations menées sur le terrain nous montrent que plusieurs de zones comptent des dépressions qui sont favorables à l'accumulation et à la stagnation d'air froid (et d'eau).

La synthèse des données de la variation spatiotemporelle de l'humidité nous apprend que pour chacune des trois soirées où le gel s'est développé, la majorité des capteurs ont enregistré le taux d'humidité le plus bas 17 minutes avant le coucher du soleil. Les figures 7, 8 et 9 montrent que les conditions s'assèchent dans le vignoble à ce moment. Les valeurs indiquées dans les figures correspondent à la durée, en minutes, entre le moment où on observe le taux d'humidité le plus bas atteint et le coucher du soleil.



Figure 7. Les valeurs correspondent à la durée en minutes, entre le moment où l’humidité était à son plus bas et le moment du coucher du soleil (Lévis) pour la nuit du 8-9 novembre 2021.



Figure 8 Les valeurs correspondent à la durée en minutes entre le moment où l’humidité était à son plus bas et le moment du coucher du soleil (Lévis) pour la nuit du 9-10 novembre 2021.

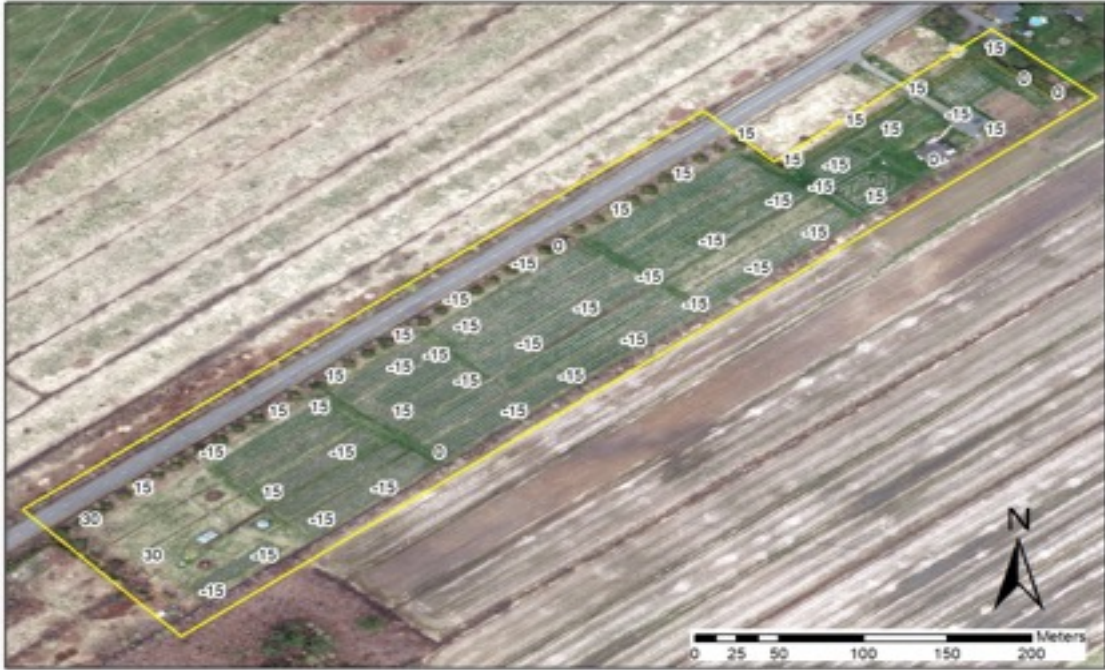


Figure 9 Les valeurs correspondent à la durée en minutes entre le moment où l'humidité était à son plus bas et le moment du coucher du soleil (Lévis) pour la nuit du 10-11 novembre 2021



## 4.2. Production des cartes thématiques

Cette étape théorique, utilisant des données LiDAR à haute résolution (2 m), permet de réaliser des cartes spécifiques. Représenter ainsi graphiquement les données met en relation différentes données pour en faire l'analyse. La carte topographique 3D (figure 10) montre clairement que le terrain est ondulé et qu'il y a donc des dépressions où l'air froid risque de s'accumuler.

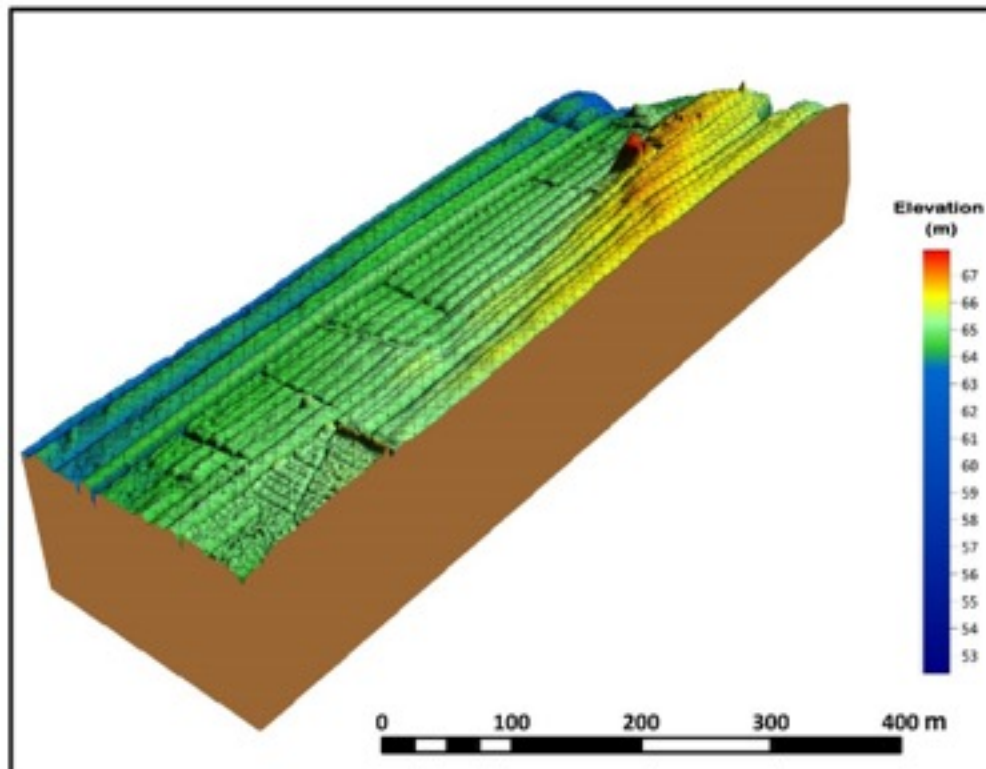


Figure 10. Représentation 3D de la carte topographique du terrain sous étude montrant la variation d'altitude du terrain.

Les cartes du potentiel d'énergie solaire (figures 11 et 12) montrent que les différentes parties du terrain absorbent l'énergie de manière homogène. On peut donc penser que la variation spatiale de la température est provoquée par la microtopographie.

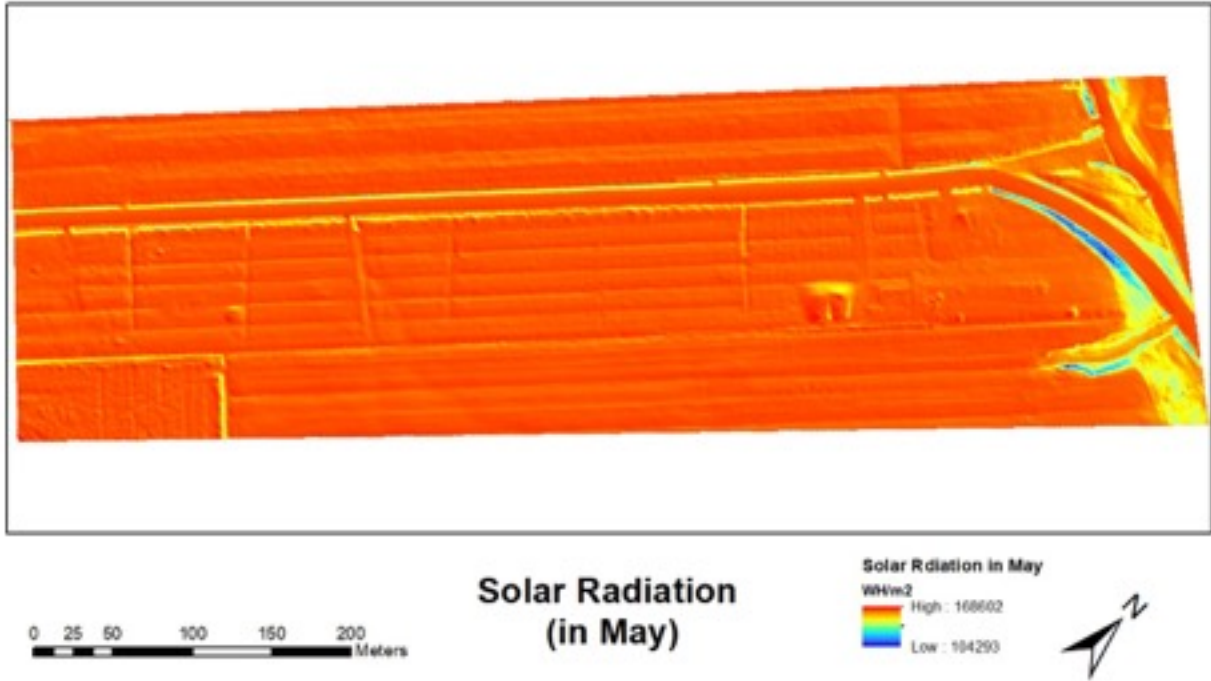


Figure 11. Carte du potentiel d'énergie solaire en mai

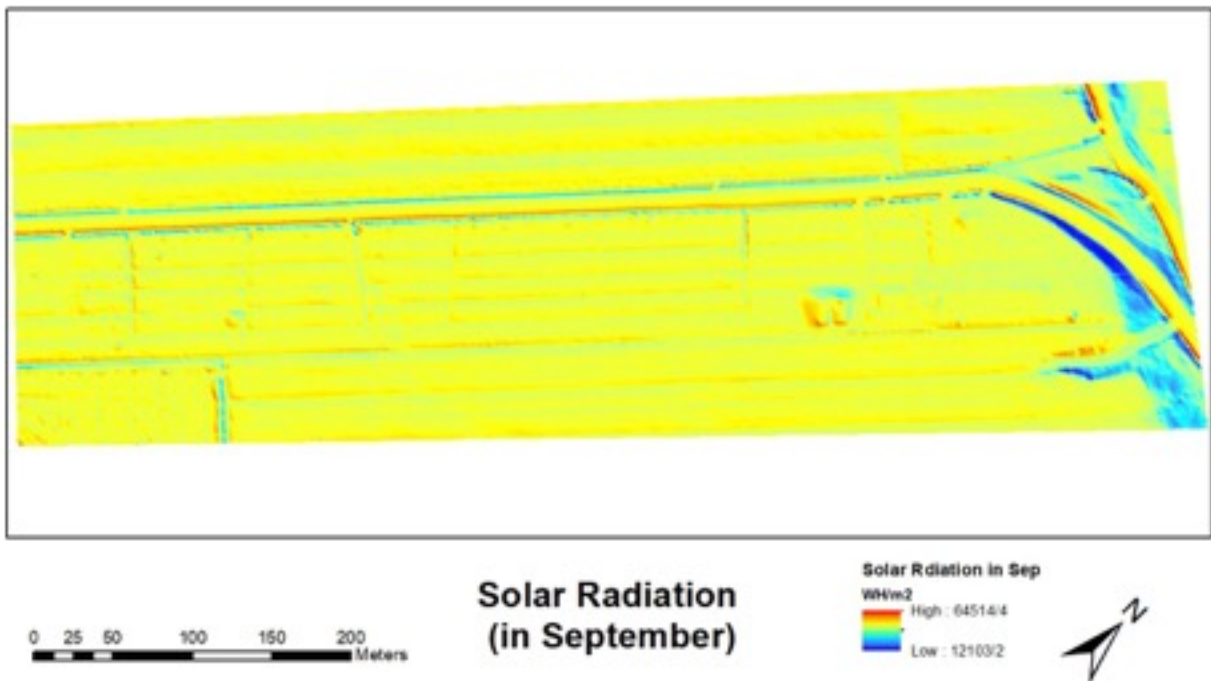


Figure 12. Carte du potentiel d'énergie solaire en septembre

Dans le même ordre d'idée, les cartes de convergence et de divergence de l'air froid illustrent le déplacement des masses d'air froid. Ainsi, les cercles dans la figure 13 indiquent que l'écoulement de l'air froid converge vers le côté sud et nord-ouest. Ces observations sont donc cohérentes avec celles obtenues par modélisation.

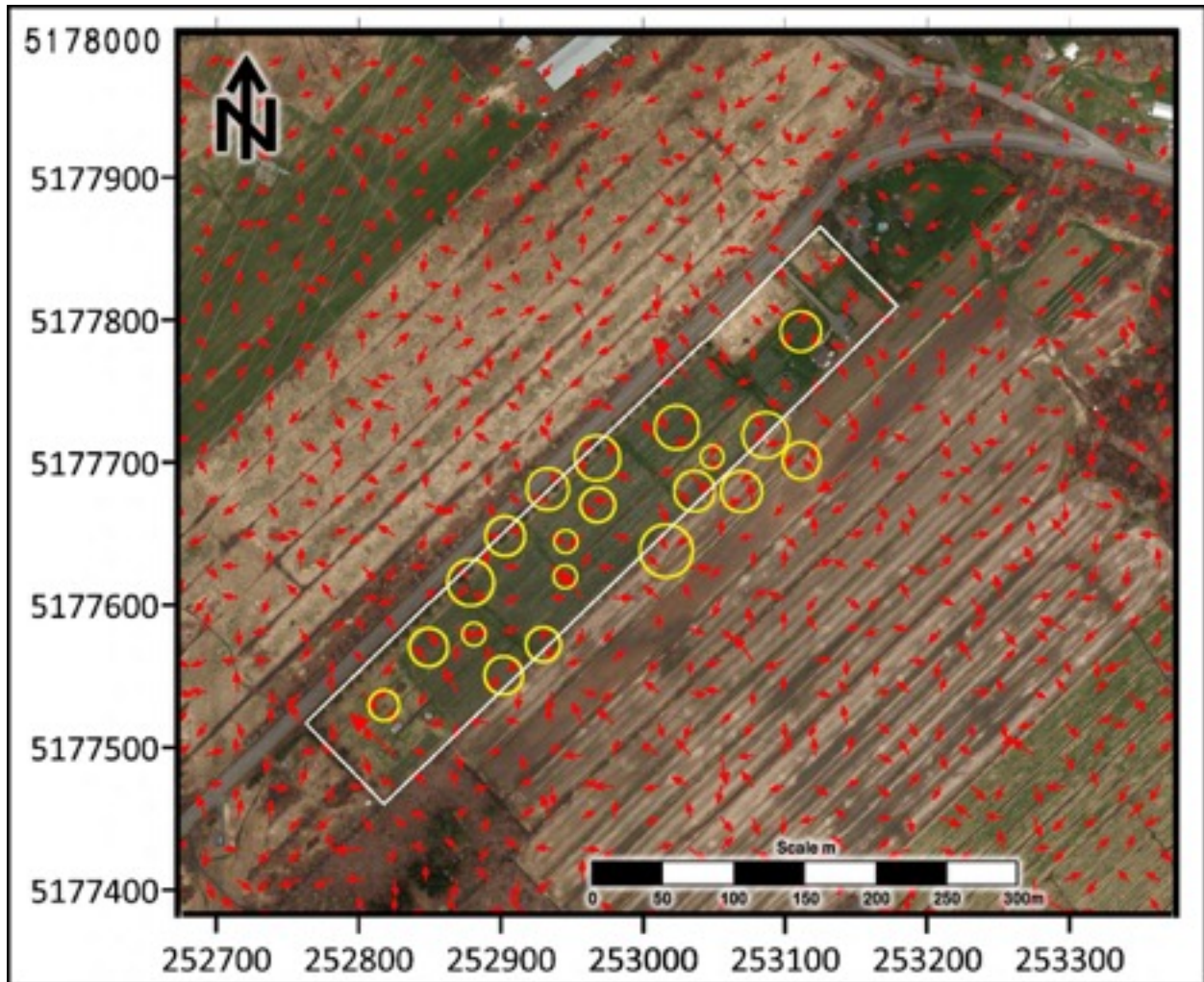


Figure 13. Modélisation de l'écoulement de l'air froid (les zones de convergence de l'air froid sont illustrées par les cercles jaunes). Le périmètre délimité par la ligne blanche représente la portion du vignoble sous étude.

La carte de trajectoire de l'air froid montre qu'il y a un réseau dense au centre du vignoble. L'air froid s'écoule vers les zones de dépression et entraîne une perte d'énergie supplémentaire.

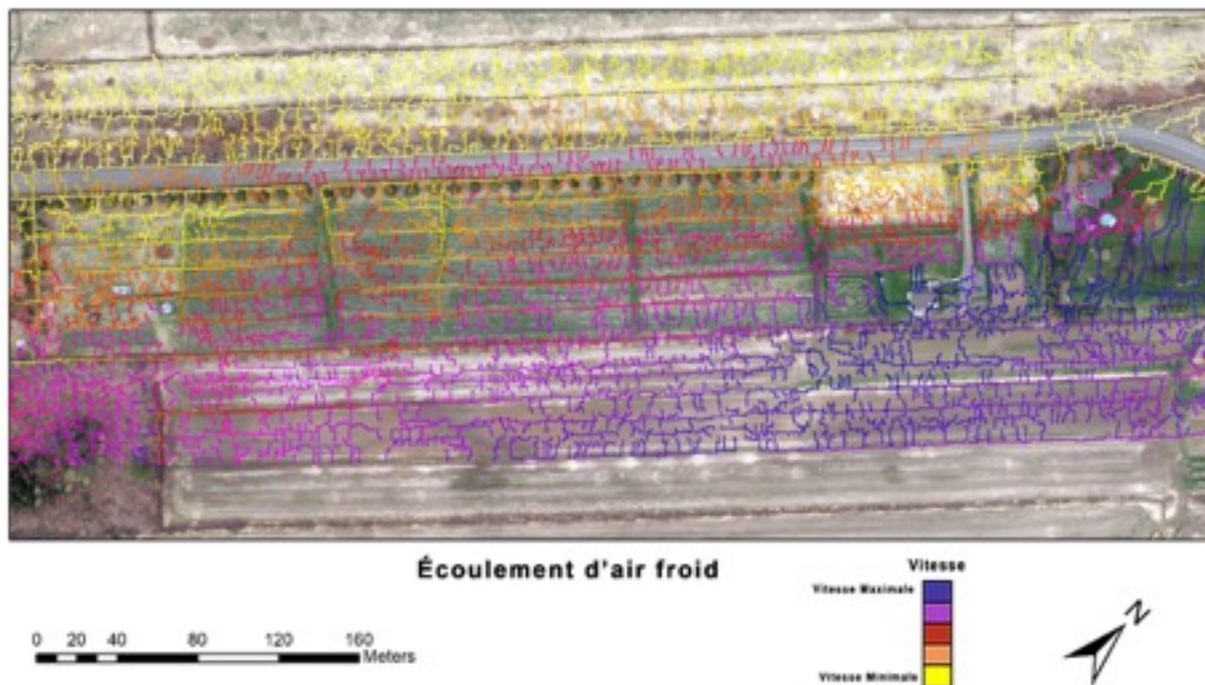


Figure 14 . Illustration des trajectoires de l'écoulement de l'air froid

## 5. Discussion et présentation du plan d'action

Le plan d'action proposé ici se fonde sur l'analyse des résultats et sur les discussions menées avec les propriétaires du vignoble Clos Lambert. La priorité de cette recherche est de développer une méthode non polluante, respectueuse de l'environnement et présentant de faibles risques (par exemple, les risques liés au feu). En se basant sur le microclimat du terrain et les mécanismes de formation du gel tel qu'analysé ici, nous proposons différents scénarios respectueux de l'approche biologique du vignoble. Le plan d'action ainsi élaboré se décline en deux parties : a) augmenter l'entropie humide et b) couper la trajectoire de l'écoulement de l'air froid en utilisant un tracteur.

### Module a) Augmenter l'entropie humide

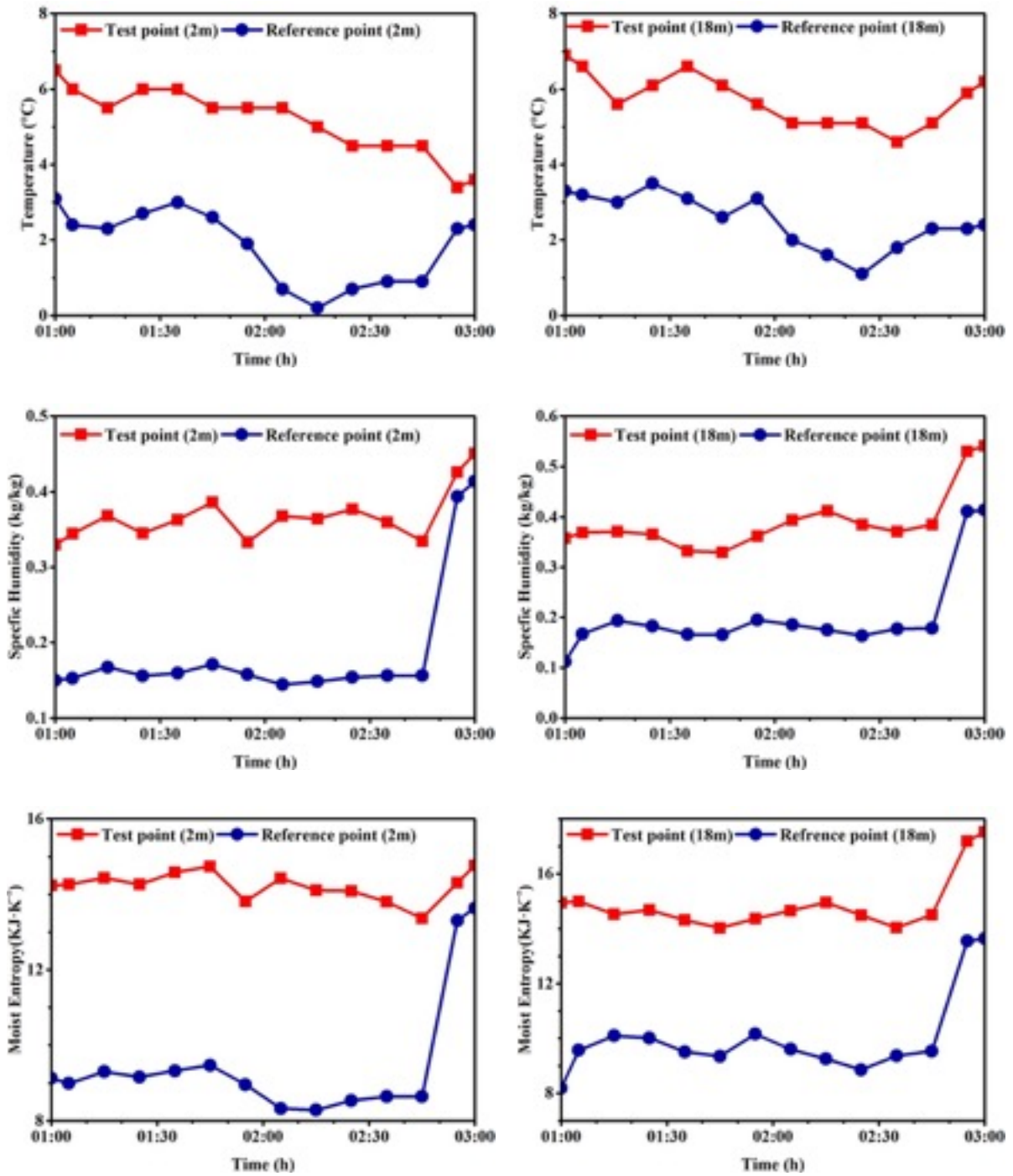
Pour réduire l'effet du gel, nous proposons une nouvelle mesure d'atténuation active respectueuse de l'environnement. Cette mesure se fonde sur le processus thermodynamique ayant lieu lors du déplacement de la vapeur d'eau d'une source humide vers un puits sec. Cette opération vise à augmenter l'humidité et la température de l'air et donc à augmenter l'entropie humide totale. Elle se distingue donc de la mesure d'atténuation des gels la plus couramment qui met l'emphase sur la température de l'air (Pauluis et al, 2002, Pauluis, 2011, Ikani, 2019). Ce que nous proposons ici s'inspire des résultats obtenus par Ikani et al. (2015) et Ikani (2019) à l'aide du Selective Inverse System (SIS). Cet essai a été réalisé dans un verger à Compton (Estrie), où la vapeur a été produite à l'aide d'un grand récipient chauffé par le dessous pour diffuser la vapeur d'eau dans l'air ambiant. La température de l'air, son humidité spécifique et l'entropie humide<sup>1</sup> à 5m (*Test point*) et 35m (*Reference point*) de distance du générateur de vapeur ont été mesurées à deux altitudes : 2 m et 18m. Comme on le voit à la figure 15, il en a résulté à la fois une augmentation de l'humidité de l'air ambiant et de l'entropie humide ce qui a, par ricochet, impacté la température ambiante (voir les deux panneaux du haut). Cet essai a permis de démontrer que l'augmentation de l'entropie humide empêche la chute de température nocturne et, par conséquent, protège du gel (Ikani et al., 2015 ; Ikani 2019).

---

<sup>1</sup> L'entropie humide a été calculée à l'aide de la formule:

$$S = (1 - q_t)(C_{pd} \ln T - R_d \ln p_d) + q_t C_l \ln T + (q_v L_v)/T - q_v R_v \ln H \quad (1)$$

Dans cette expression  $q_t$  est le rapport de mélange pour la vapeur d'eau,  $C_{pd}$  est la chaleur spécifique à pression constante de l'air sec,  $C_l$  est la chaleur spécifique de l'eau liquide,  $T$  est la température,  $q_v$  est l'humidité spécifique,  $L_v$  est la chaleur latente de vaporisation,  $R_d$  et  $R_v$  sont les constantes de gaz et de la vapeur d'eau,  $p_d$  est la pression partielle de l'air sec et  $H$  est l'humidité relative.



Type text here

Figure 15. Température de l'air, humidité spécifique et entropie humide mesurées à 5m (*Test point*) et à 35m (*Reference point*) de distance du générateur d'humidité à deux altitudes, 2 m et 18m, dans la nuit du 14 mai 2015 entre 1h et 3h à la cidrerie/verger Ferland, en Estrie.

C'est donc confiants dans ces derniers résultats, que nous proposons pour le vignoble Clos Lambert un plan d'intervention qui reposera également sur l'entropie humide, qui conjuguera donc l'humidité de l'air et l'entropie humide pour tenter d'influencer la masse thermique (Ikani, 2019). Selon les résultats obtenus présentés aux figures 7-9 de la présente étude, le plan d'action fondé sur l'augmentation de l'humidité doit être mis en place 30 minutes avant le coucher du soleil afin d'éviter une baisse d'humidité dans le vignoble, puisque selon nos observations, le taux d'humidité le plus bas observé dans le vignoble survient 17 minutes avant le coucher du soleil.

La méthode innovante proposée ici est illustrée par la figure 16. Un réservoir d'eau chauffé par un brûleur au gaz propane est muni de 4 petits ventilateurs ce qui assurera une diffusion plus étendue de la vapeur chaude, augmentant ainsi le taux d'humidité et la température de l'air dans les parties les plus froides du vignoble. Les ventilateurs et les tuyaux permettront de diriger l'air, et donc de diffuser l'énergie thermique, dans quatre directions maximisant l'effet de l'énergie thermique nécessaire à la neutralisation du froid. Nous croyons que la turbulence générée par les ventilateurs empêchera l'air froid de stagner près du sol et causera une inversion thermique plus efficace. Afin d'empêcher ou de minimiser la possibilité de condensation de vapeur d'eau dans les tuyaux, dans le prototype projeté les tuyaux ne devraient pas dépasser 30 cm de longueur, car, en effet, si les tuyaux étaient trop longs, il y aurait augmentation de ce risque de condensation.



Figure 16. Prototype d'une machine à vapeur d'eau

Module b) Couper la trajectoire de l'écoulement de l'air froid en utilisant un tracteur

Afin de diminuer l'écoulement de l'air froid, nous proposons d'utiliser un tracteur se déplaçant selon la trajectoire présentée à la figure 17. Afin d'optimiser l'effet protecteur du tracteur, on devra repasser au même endroit toutes les 7-8 minutes (Barriault, 2021). Il est toutefois possible que, si les générateurs de vapeur sont suffisamment efficaces, cette dernière mesure soit inutile.



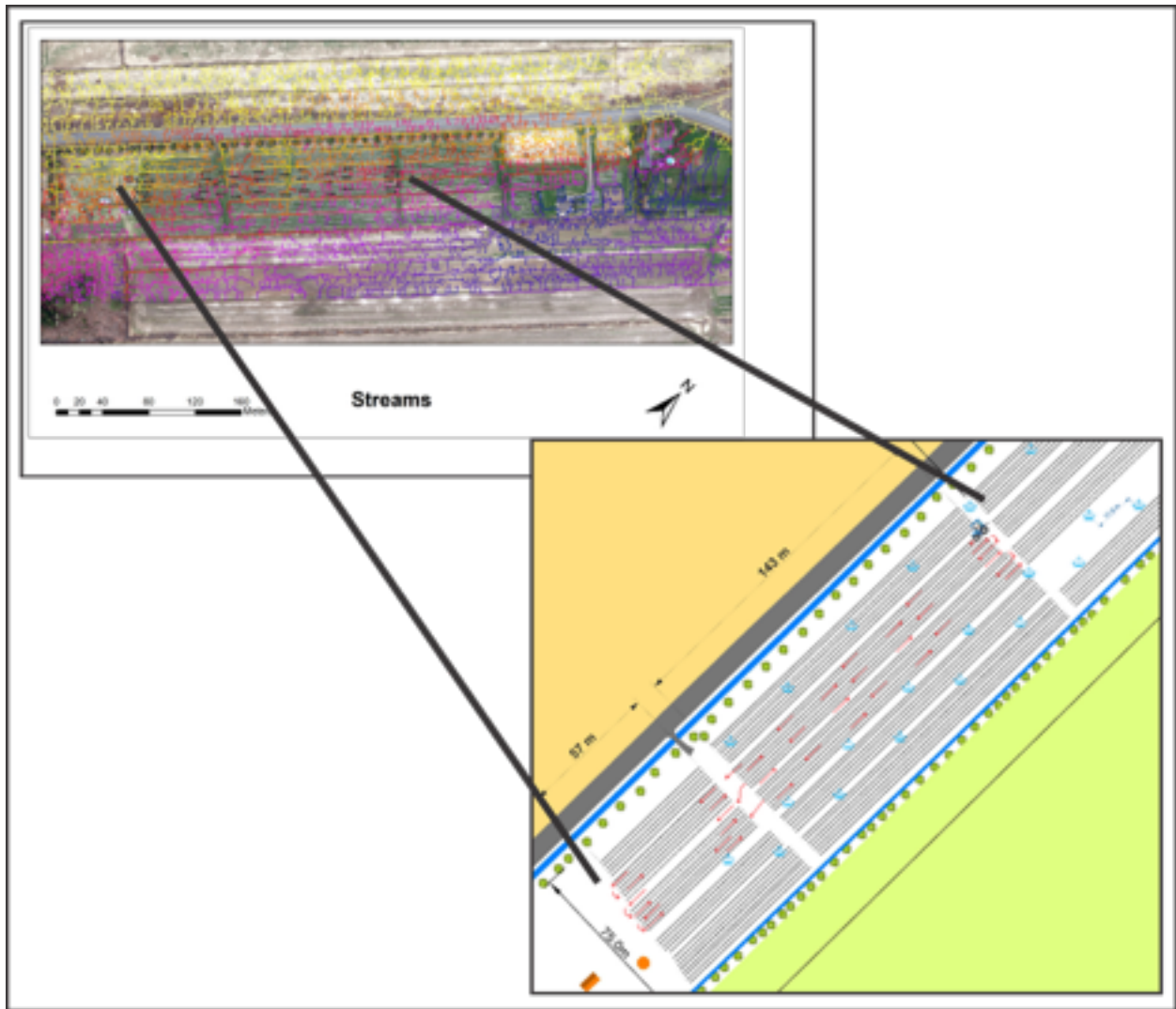


Figure 17. Circuit proposé pour le tracteur.

La combinaison des modules a) et b) constitue le plan d'intervention suggéré ; il est présenté à la figure 18. On y voit les emplacements proposés pour installer de 20 générateurs d'entropie humide (systèmes de production de vapeur d'eau), ainsi que la trajectoire du tracteur.

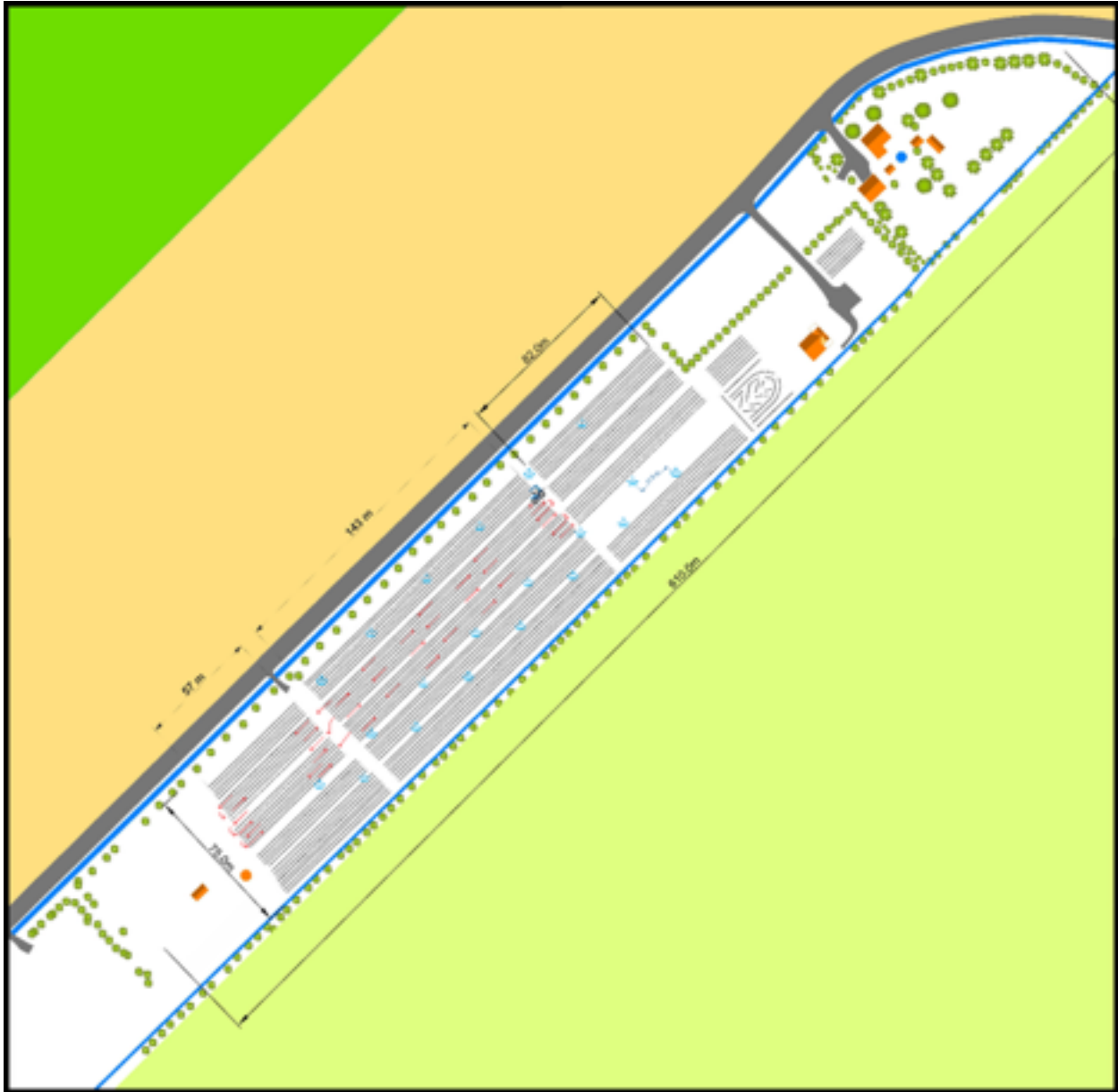


Figure 18. Emplacements proposés pour l'installation des générateurs d'entropie humide dans le vignoble et trajectoire du tracteur.

## 5. Conclusion et recommandations

La mesure d'atténuation du froid la plus couramment utilisée se concentre sur la température de l'air. La méthode proposée ici met plutôt à profit le principe physique de l'entropie humide, basé sur le taux d'humidité, la température et la masse thermique.

L'optimisation du plan d'action proposé ici et sa mise en œuvre optimale exigeront de nouveaux essais: Il faudra en particulier que le vignoble mette au point un générateur de vapeur efficace, qu'il s'équipe de stations météo performantes et qu'il estime la superficie que couvre le générateur avant son déploiement sur le terrain et son application à plus grande échelle. Uniquement après le déploiement dans le vignoble pourrons nous savoir si le recours à un tracteur sera nécessaire pour couper la trajectoire de l'écoulement de l'air froid vers le centre du terrain.

La méthode d'intervention proposée dans le cadre de ce projet de recherche, si elle est validée par les résultats attendus, pourra être étendue à d'autres secteurs de l'agriculture en pays nordiques car le principe physique sur lequel elle repose est universel.

## 6. Références :

Figuerola P.J. and Mazzeo N.A., 1997. An analytical model for the prediction of nocturnal and surface temperatures under calm, clear sky conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85, pp. 229-237.

Ikani. V., 2019. Amélioration de la capacité de modélisation et de mitigation du gel radiatif au milieu agricole. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

Ikani. V., Chokmani K., Turcotte. C., Granberg. H., 2015. Micrometeorological observations for the evaluation of the Selective Inverted Sink (SIS) against radiation frost and the potential of a new hybrid system, *Procedia Earth and Planetary Science* Volume 15, p. 920-927.

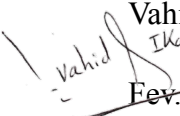
Pauluis, O., 2011, Water Vapor and Mechanical Work: A Comparison of Carnot and Steam Cycles. *J. The Atmospheric Sciences*, 68, pp.91-102.

Pauluis, O. and Held, I.M., 2002. Entropy Budget of an Atmosphere in Radiative–Convective Equilibrium. Part I: Maximum Work and Frictional Dissipation. J. The Atmospheric Sciences, 59, pp. 125-139.

Barriault. E., 2021. Gel printanier et méthodes de protection. Webinaires CRAAQ, 19 avril 2021.

### **Remerciements**

Je voudrais dans un premier temps remercier, M. Lambert du Vignoble de Clos Lambert, pour sa patience, sa disponibilité, ses conseils, ses aides et pour le temps qu'il a consacré dans la réalisation de cette recherche. Un grand merci également au MAPAQ, au réseau Agri conseils de la Chaudière-Appalaches et au vignoble Clos Lambert pour leur support financier. La réalisation de cette recherche a été rendue possible grâce leur aide. J'aimerais exprimer ma gratitude à Madame Gaelle Dubé, qui a pris le temps de discuter de mon sujet ainsi que de réviser le rapport.

  
Vahid Ikani  
Fev. 2022