



Analyse de l'Efficacité et de l'Utilité du Système Froilight pour la Protection des Vignobles dans un contexte québécois



Réalisé par :

Vahid Ikani, Ph.D. Consultant en Agrométéorologie
Richard Small, vigneron (Domaine Small)

Collaboration : Jenny Leblanc, agronome

Mars 2025

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

Québec 

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport
émanent de l'auteur ou des auteurs et n'engagent aucunement
le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

1. Introduction :

La veille technologique concernant la protection des vignobles des gels printaniers est à l'heure actuelle principalement orientée vers des techniques innovantes et respectueuses de l'environnement. Les solutions souhaitées doivent viser une réduction de la main-d'œuvre et des coûts, en plus de présenter un bilan carbone favorable.

Plusieurs moyens de protection pour contrer les gels par rayonnement existent, mais jusqu'à présent, aucun ne constitue une solution idéale. De plus, l'activation d'un système de protection contre le gel dans des conditions inadéquates peut s'avérer plus dommageable que l'absence totale d'intervention.

La compagnie Frolight propose grâce à l'installation, près des bourgeons des tubes émettant une lumière infrarouge (IR). Une solution permettant la protection du vignoble lors d'épisodes de gels printaniers. (www.frolight.com).

Noté que l'information retrouvé au préalable de ce projet provenait principalement des fournisseurs de la technologique puisqu'aucun essai, publications scientifiques ni documentation impartiale n'a été trouvé sur le sujet.

L'intérêt du système FROLIGHT est grandissant auprès des producteurs puisqu'il s'enorgueillit d'une installation rapide et d'une activation du système simple et de manière automatique. Le coût total estimé pour 48 lignes de 100 m, est d'environ 40 000 \$ CAD (Ref : Oak Leaf Inc. Représentant du système Frolight, Québec).

L'installation préalable à l'épisode de gel est également un avantage étant donné que la période propice au gel survient principalement la nuit. En fonctionnant de manière entièrement automatique grâce à son application, le système mérite certes une évaluation de son efficacité dans un contexte québécois.

L'essai mise en place au Domaine Small, vignoble biologique situé à Saint Agathe de Lotbinière dans la région de la Chaudière Appalaches a pour objectif d'évaluer l'efficacité du câble électrique dans des conditions propices au gels dans un contexte climatique québécois.

2. Méthodologie

La méthode utilisée repose principalement sur la collecte de données temporelles et spatiales à très haute résolution, fournies par un réseau de sondes météorologiques. Une caméra infrarouge thermique a été utilisé pour détecter et visualiser l'effet du système Frolight.

Le projet a été réalisé lors des soirées et nuits du 27 au 28 novembre, du 2 au 3 décembre, ainsi que du 3 au 4 décembre, ces 3 périodes ayant été choisies en raison des conditions météorologiques associées à des épisodes de gel radiatif. La méthodologie comprend trois phases distinctes, décrites comme suit.

- Phase 1 Installation du système Frolight,
- Phase 2 Installation des réseaux de sondes météorologiques
- Phase 3 Évaluation des effets thermiques du système Frolight.

Phase 1 : Installation du système Frolight

Le premier volet consiste à l'installation du câble Frolight sur quatre rangées à la hauteur des rameaux fructifères des vignes. Les câbles infrarouges Frolight ont été installés sur quatre lignes (Ligne_1, Ligne_2, Ligne_3 et Ligne_4), chacune mesurant 25 mètres de longueur. L'installation nécessite une attention particulière afin que la protection soit optimale. Les câbles Frolight doivent être positionnés près des rameaux fructifères que l'on souhaite protéger. L'unité de contrôle du système, s'est avérée relativement facile à installer.



Source :[Frolight Systems | Frolight - Infrared Frost Protection Systems](https://frolightsystems.com/frolight-infrared-frost-protection-systems)

L'intérêt de la télédétection réside dans sa capacité à détecter plus précisément l'influence thermique des câbles. À cet effet, une caméra thermique à haute résolution, modèle VarioCAM HiRes, a été utilisée (voir Figure 1 a &b).

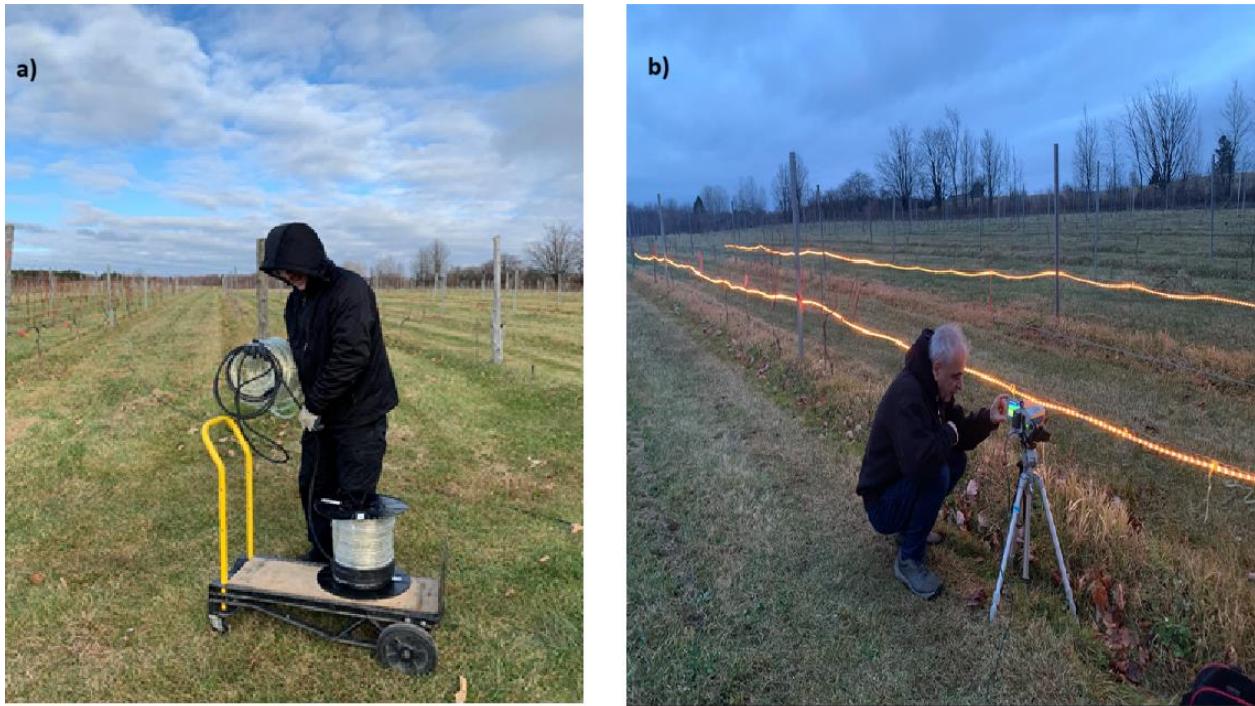


Figure 1. a) Installation des câbles Frolight ; b) Installation de caméra infrarouge¹. Domaine Small, Sainte-Agathe-de-Lotbinière, Chaudière-Appalaches.

Phase 2 : L'installation des réseaux de sondes

La température a été enregistrée à intervalles réguliers à l'aide de sondes météorologiques placées à la même position sur chacune des lignes, garantissant une comparabilité optimale. Dans la section à l'essai, des sondes de température (HUATO HE17 séries data logger) ont été installées. La résolution temporelle des données est d'une minute (60 seconds), et la résolution spatiale est de cinq mètres. De plus, la vitesse du vent a été mesuré à une hauteur de 1 mètre au-dessus de la surface à l'aide d'un anémomètre numérique.

➤ Convention de désignation des sondes adoptée dans cet essai

Étant donné que chaque ligne comporte six thermomètres, nous indiquons le numéro de chaque sonde (Figure 2) à l'aide du format "LineX_Ty", où X représente le numéro de la ligne et y celui

du thermomètre. Par exemple, "Line1_T5" désigne la cinquième sonde de la ligne 1. Pour la ligne de référence, seule la numérotation de la sonde est indiquée.¹

La Figure 2, illustre schématiquement l'installation des sondes, les lignes équipées de Frolight, ainsi que la ligne témoin sans Frolight.

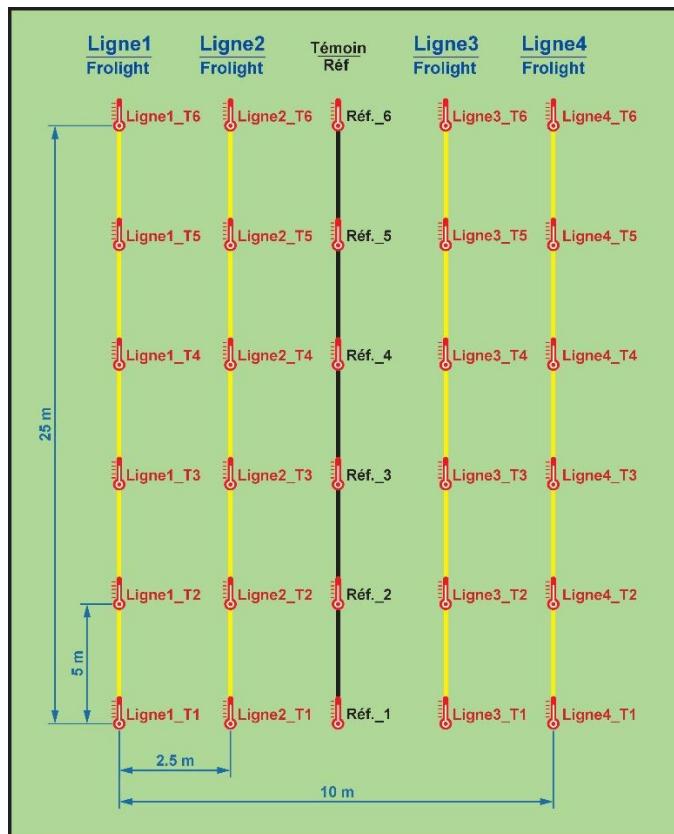


Figure 2. Illustration schématique du modèle d'installation, indiquant quatre lignes équipées et une ligne non équipée, désignée Réf (Témoin).

Phase 3 : L'évaluation des effets thermiques du système Frolight par l'analyses statistiques et l'imagerie infrarouge

Pour comparer les températures entre les lignes équipées du câble Frolight et la ligne témoin, différentes méthodes d'analyse statistique ont été appliquées. Tout d'abord, nous avons utilisé des séries temporelles à haute résolution (60 minutes) pour suivre et visualiser l'évolution des températures sur chaque ligne. Pour approfondir cette analyse, nous avons ensuite eu recours à la

¹ Caractéristiques de la caméra thermique (VarioCAM HiRes) : Réponse spectrale : 7,5 µm à 14 µm, Résolution : 1280 x 960 pixels, Résolution thermique : 30mK.

méthode des boîtes à moustaches afin d'évaluer la distribution des températures mesurées sur les quatre lignes équipées du système Frolight et la ligne témoin. Cependant, bien que cette méthode offre une vue descriptive des données, elle ne permet pas de déterminer si les différences observées sont statistiquement significatives, en l'absence d'un test de significativité. Pour surmonter cette limitation et confirmer quantitativement les tendances identifiées, nous avons appliqué le test de Kruskal-Wallis. Cette méthode statistique non paramétrique, particulièrement adaptée à la comparaison de plus de deux groupes indépendants sans présupposer une distribution normale des données. Cette méthode s'est révélée idéale pour analyser les variations de température enregistrées dans notre essai. Finalement, l'analyse a été complétée par l'utilisation d'une caméra infrarouge thermique, qui a permis de détecter l'effet du système Frolight sur les micro-variations thermiques des rameaux de vigne.

3 Résultats :

Cette section des résultats est organisée en cinq étapes distinctes. Dans un premier temps, nous présentons les variations temporelles des températures, illustrant l'évolution des températures mesurées par six thermomètres sur chaque ligne, y compris la ligne témoin. Ensuite, nous procédons à une analyse statistique à l'aide de la méthode de la boîte à moustaches, ou si appelé le diagramme en boîte. La troisième étape consiste à réaliser une analyse des variations temporelles des températures moyennes. En quatrième étape, une analyse par le test de Kruskal-Wallis est présentée pour évaluer les différences significatives. Enfin, la cinquième étape se concentre sur les résultats issus de l'imagerie infrarouge, complétant l'évaluation des effets thermiques.

3.1 Visualisation des variations temporelles de la température entre les lignes équipées de Frolight et la ligne de référence (Témoin)

Les résultats présentent une série temporelle des températures de l'air ($^{\circ}\text{C}$) enregistrées au cours de la nuit du 27 au 28 novembre, la nuit du 2 au 3 décembre, et 3 au 4 décembre, comparant quatre lignes équipées de câbles chauffants à une ligne de référence non équipée (Témoin). Pour chaque nuit d'observation, nous présentons quatre diagrammes (Ligne_1, Ligne_2, Ligne_3 et Ligne_4) affichant les séries temporelles de température des douze sondes, avec six courbes correspondant

à la ligne équipée et six à la ligne de référence. L'axe des x représente l'heure, tandis que l'axe des y indique la température en °C.

3.1.1 Résultat de la soirée/nuit du 27 au 28 novembre

Les figures 3, 4, 5 et 6 illustrent la variation temporelle des températures enregistrées par six thermomètres des lignes 1, 2, 3 et 4, respectivement, en comparaison avec la ligne témoin. Les résultats indiquent que, à l'exception de la ligne 1, les températures des lignes équipées du câble Frolight sont généralement plus élevées que celles de la ligne témoin. Cependant, cette élévation de température n'est pas immédiate et nécessite un certain temps pour se manifester pleinement.

Par ailleurs, des baisses de température sont observées occasionnellement sur de courtes périodes, probablement dues aux cycles d'arrêt du système. Le système Frolight, équipé d'un thermostat, s'arrête en fonction d'un seuil de température souhaité et programmée.

Comparaison des Variations de Température entre la Ligne _1 Équipée du Câble et la Ligne Non Équipée (Témoin) – Soirée/Nuit du 27 au 28 Novembre

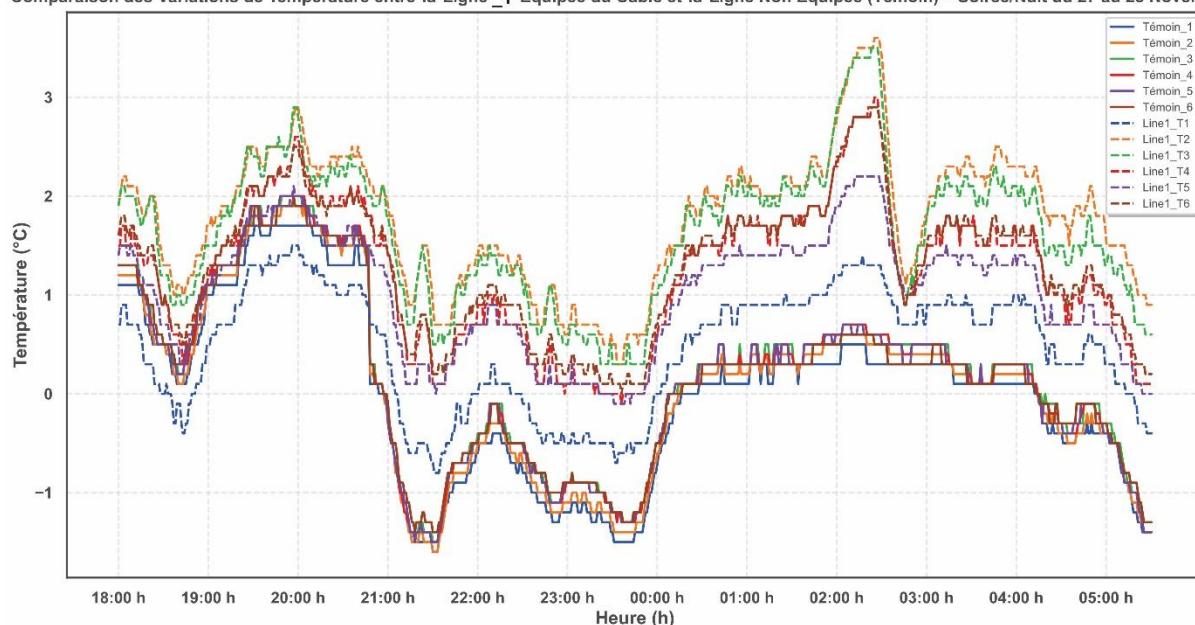


Figure 3. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Frolight et Témoin (soirée/nuit du 27 au 28 novembre)

2025-03-12

Comparaison des Variations de Température entre la Ligne _2 Équipée du Câble et la Ligne Non Équipée (Témoin) – Soirée/Nuit du 27 au 28 Novembre

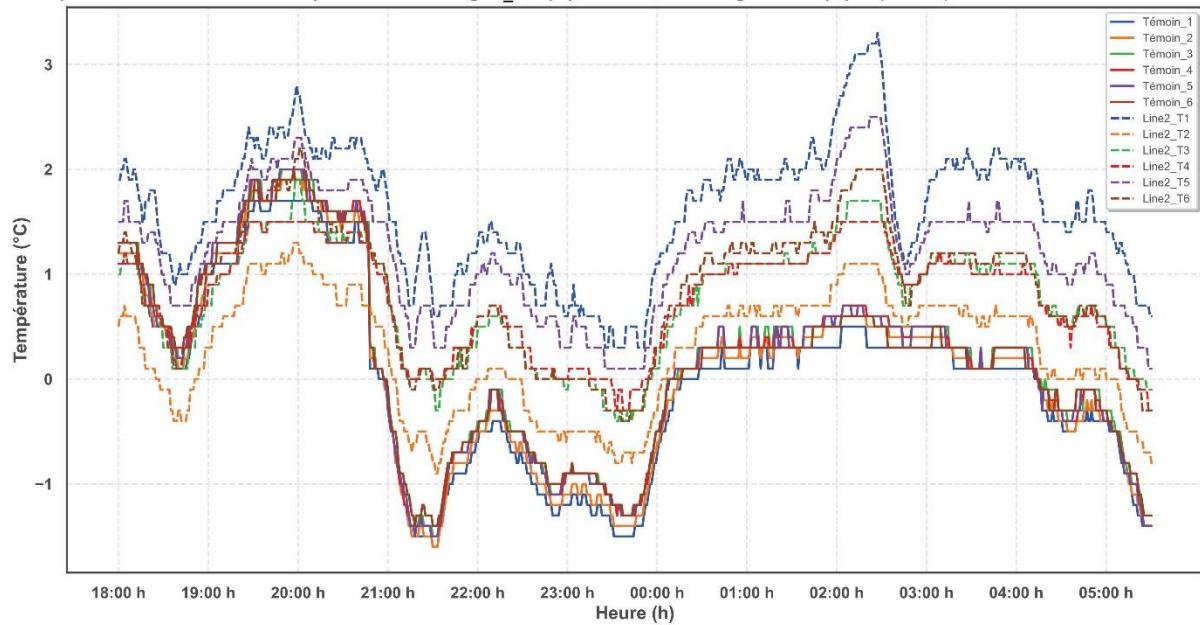


Figure 4. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Frolight et Témoin (soirée/nuit du 27 au 28 novembre)

Comparaison des Variations de Température entre la Ligne _3 Équipée du Câble et la Ligne Non Équipée (Témoin) – Soirée/Nuit du 27 au 28 Novembre

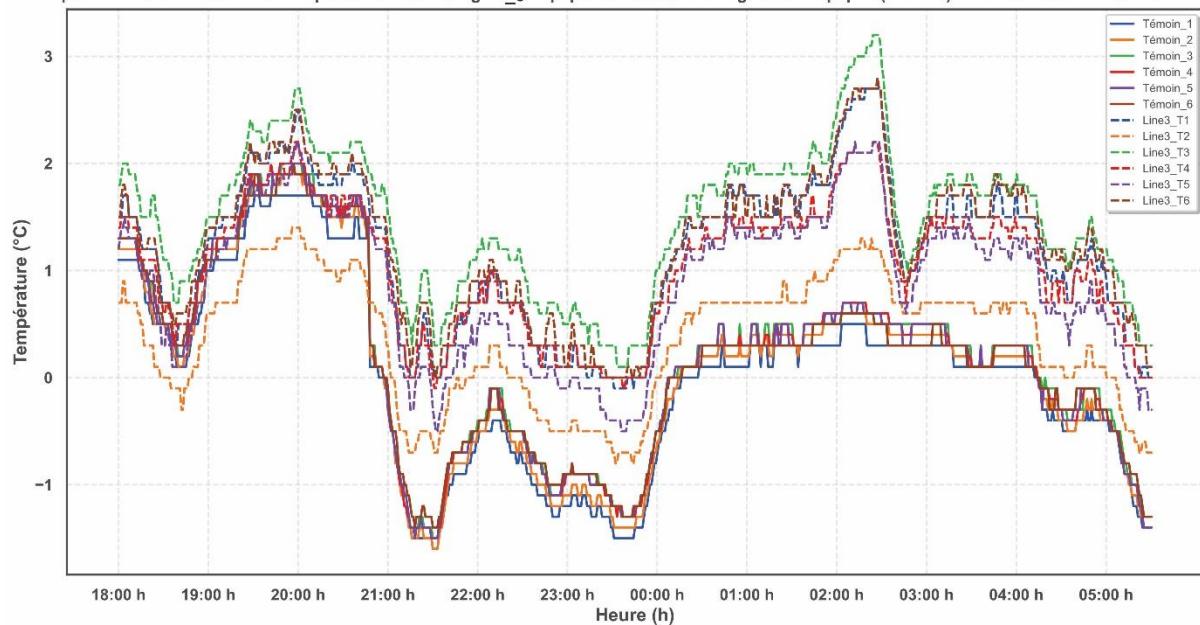


Figure 5. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Frolight et Témoin (soirée/nuit du 27 au 28 novembre)

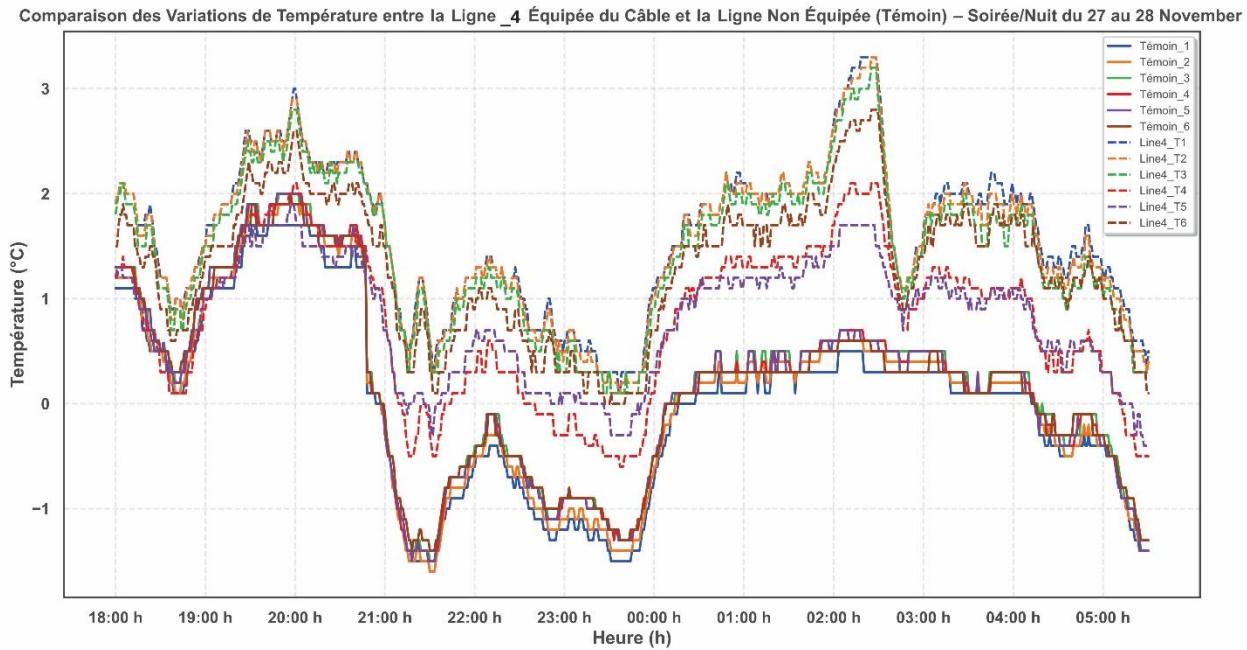


Figure 6. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Frolight et Témoin (soirée/nuit du 27 au 28 novembre)

3.1.2 Résultat de la soirée/nuit du 2 au 3 Décembre

Les figures 7, 8, 9 et 10 illustrent les variations temporelles des températures mesurées par six thermomètres sur les lignes 1, 2, 3 et 4, ainsi que sur la ligne témoin, lors de la soirée/nuit du 2 au 3 décembre. Ces quatre figures, qui présentent systématiquement les mesures des six thermomètres de chaque ligne, révèlent des températures globalement plus élevées. Cependant, on observe une variation spatiale parmi ces six thermomètres, ce qui souligne l'importance de prendre en compte l'effet de microclimat.

La différence de température maximale (ligne équipée du câble moins la ligne témoin) peut atteindre environ 2 °C à certains moments. Par ailleurs, en soirée, lorsque la température baisse, le taux de refroidissement semble plus élevé pour les six thermomètres de la ligne témoin que pour ceux des lignes équipées. Dans l'ensemble, le graphique met en évidence l'efficacité potentielle du câble chauffant à maintenir une température plus élevée durant les heures les plus froides. Les différences entre les six thermomètres sur chaque ligne rappellent une fois de plus l'importance de l'emplacement et des conditions microclimatiques.

2025-03-12

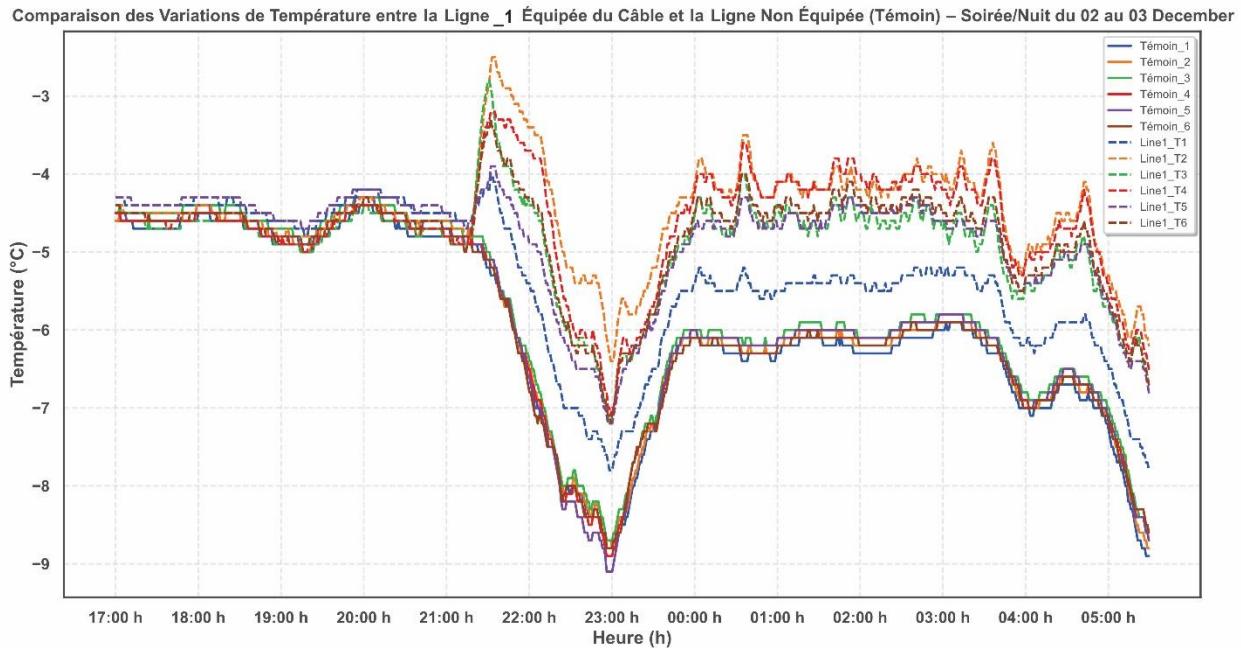


Figure 7. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Frolight et Témoin (soirée/nuit du 2 au 3 décembre)

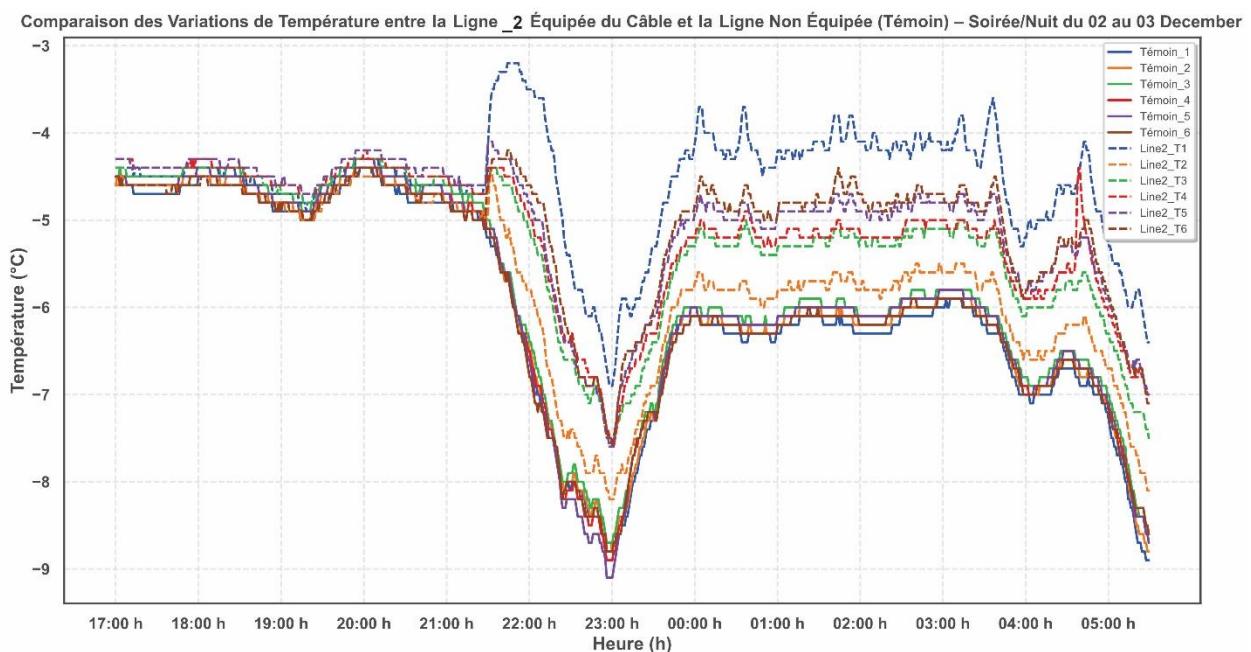


Figure 8. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Frolight et Témoin (soirée/nuit du 2 au 3 décembre)

2025-03-12

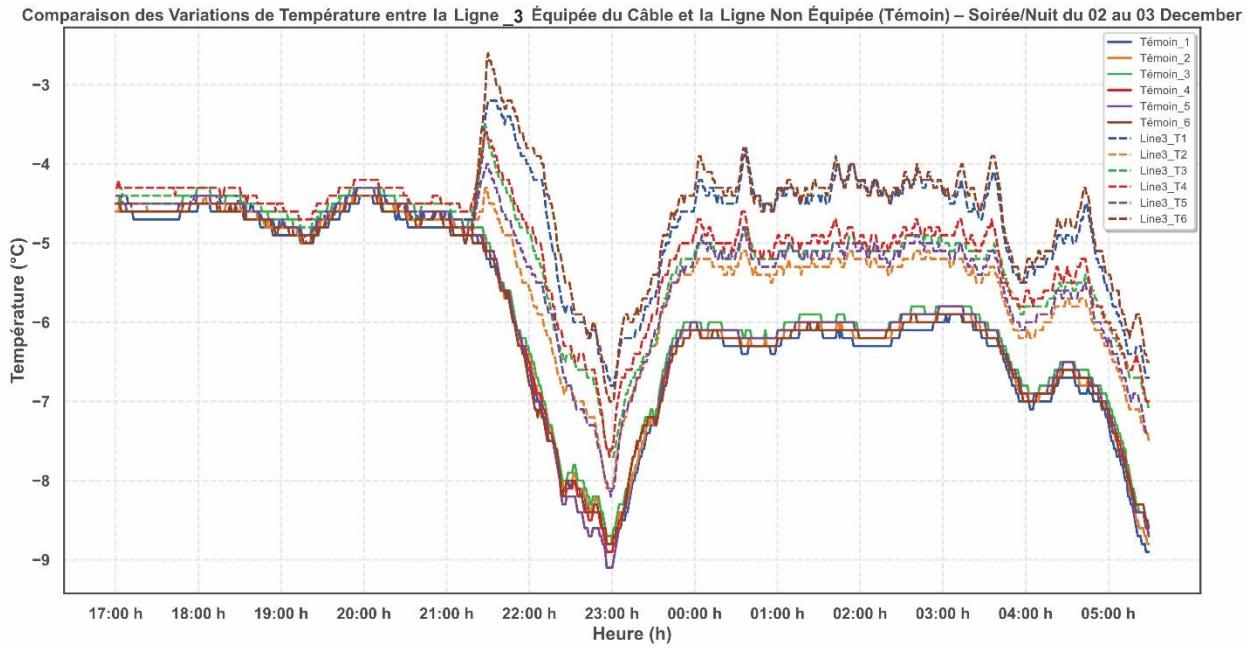


Figure 9. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Froflight et Témoin (soirée/nuit du 2 au 3 décembre)

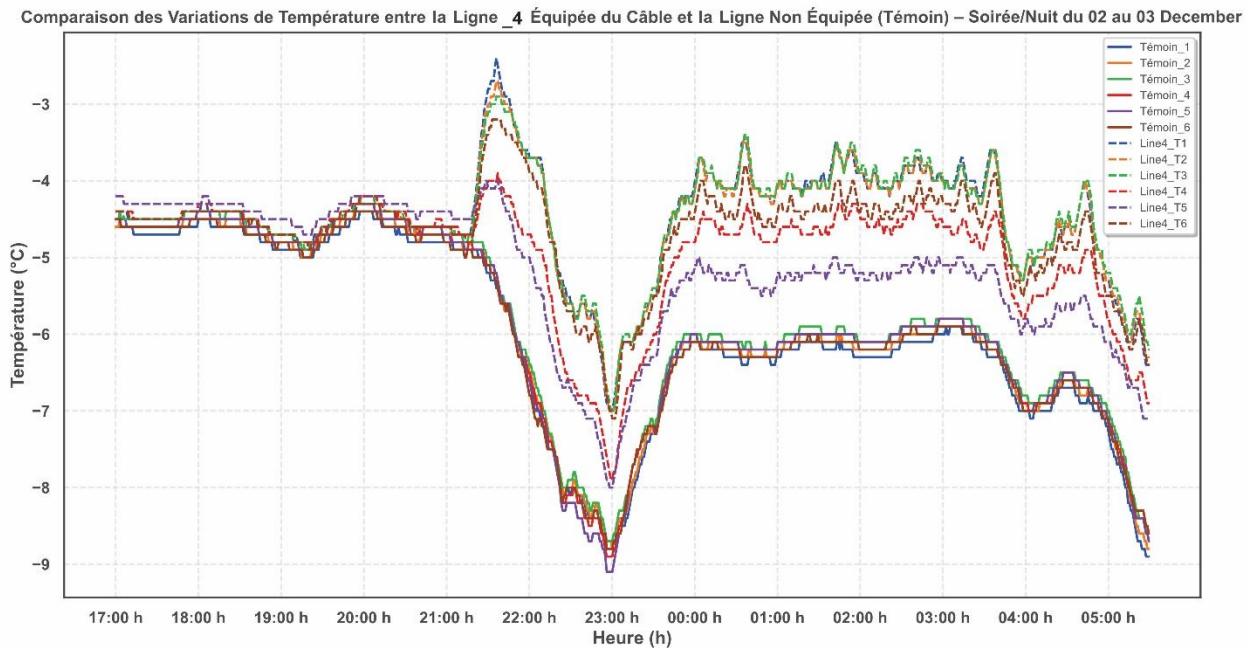


Figure 10. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Froflight et Témoin (soirée/nuit du 3 au 4 décembre)

3.1.3 Résultat de la soirée/nuit du 3 au 4 décembre

Les figures 11, 12, 13 et 14 illustrent les variations temporelles des températures mesurées par six thermomètres sur les lignes 1, 2, 3 et 4, ainsi que sur la ligne témoin, lors de la soirée/nuit du 3 au 4 décembre. Les patterns observés lors de la soirée/nuit du 3 au 4 décembre se révèlent généralement semblables à ceux des deux soirées précédemment mentionnées.

Pour cette nuit également, les diagrammes illustrent que la différence de température maximale entre une ligne équipée du câble et la ligne témoin peut atteindre environ 2 °C à certains moments. Les résultats démontrent que l'effet thermique du câble chauffant reste constant sur toute sa longueur et ne décroît pas avec la distance. Par exemple, la température mesurée au 5^e mètre du câble est comparable à celle relevée au 25^e mètre. Toutefois, il arrive que la température au 20^e ou au 25^e mètre soit légèrement plus élevée qu'au 5^e mètre, suggérant des variations locales.

Il est à noter que, compte tenu d'une résolution temporelle de 60 secondes, les résultats révèlent parfois un gradient de température entre les six thermomètres, bien que ces variations se manifestent sur de courtes périodes. Ces écarts observés le long d'une même ligne sont généralement attribuables à des facteurs environnementaux externes, tels que la microtopographie, plutôt qu'à une dégradation des performances du câble lui-même. Par ailleurs, les résultats de cette période, en cohérence avec ceux mentionnés précédemment, suggèrent que le système peut nécessiter un certain temps pour influencer la température, notamment lorsque la baisse de la température ambiante est rapide.

Il faut noter que les sondes s'activent et se désactivent automatiquement, sans qu'une corrélation apparente ne soit établie avec la température ambiante, ce qui soulève des doutes quant à l'efficacité de l'autorégulation du système. Un seul thermostat contrôle les quatre lignes, ce qui peut engendrer des disparités de température entre elles. Par ailleurs, ce thermostat est situé dans le boîtier de commande, où la température peut différer de celle de l'environnement extérieur. Ces observations suggèrent que l'aspect autorégulant du système Froilight n'est pas pleinement validé dans ces conditions.

2025-03-12

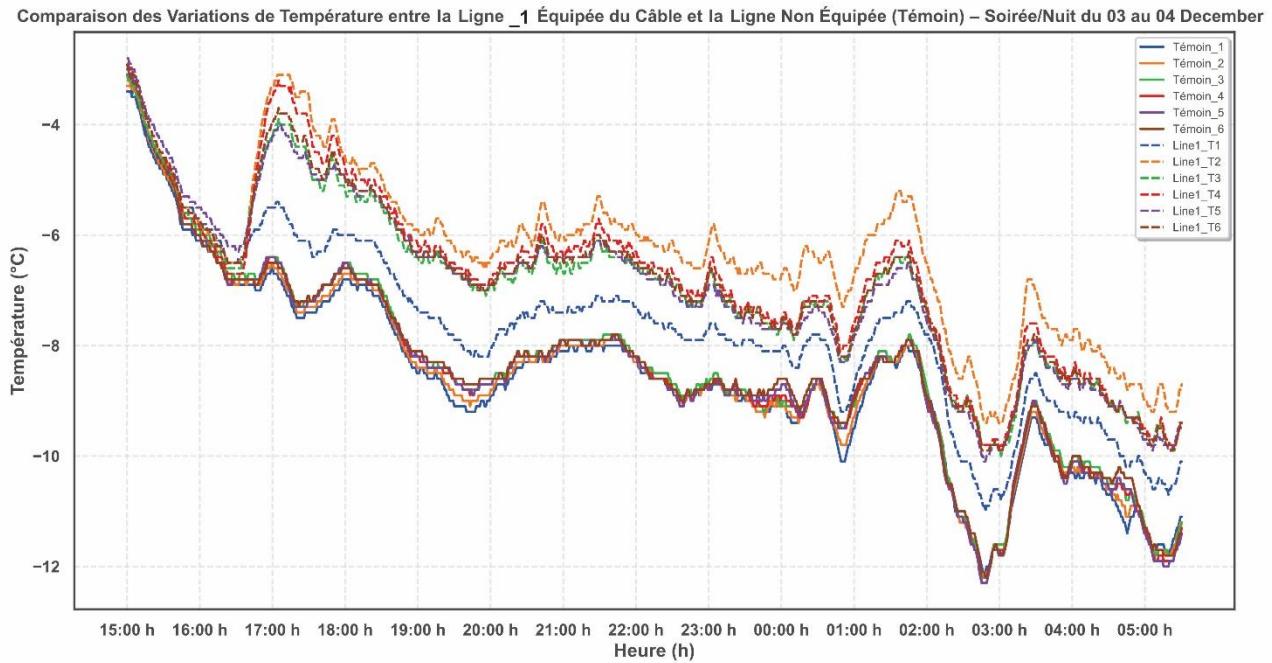


Figure 11. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Frolight et Témoin (soirée/nuit du 3 au 4 décembre)

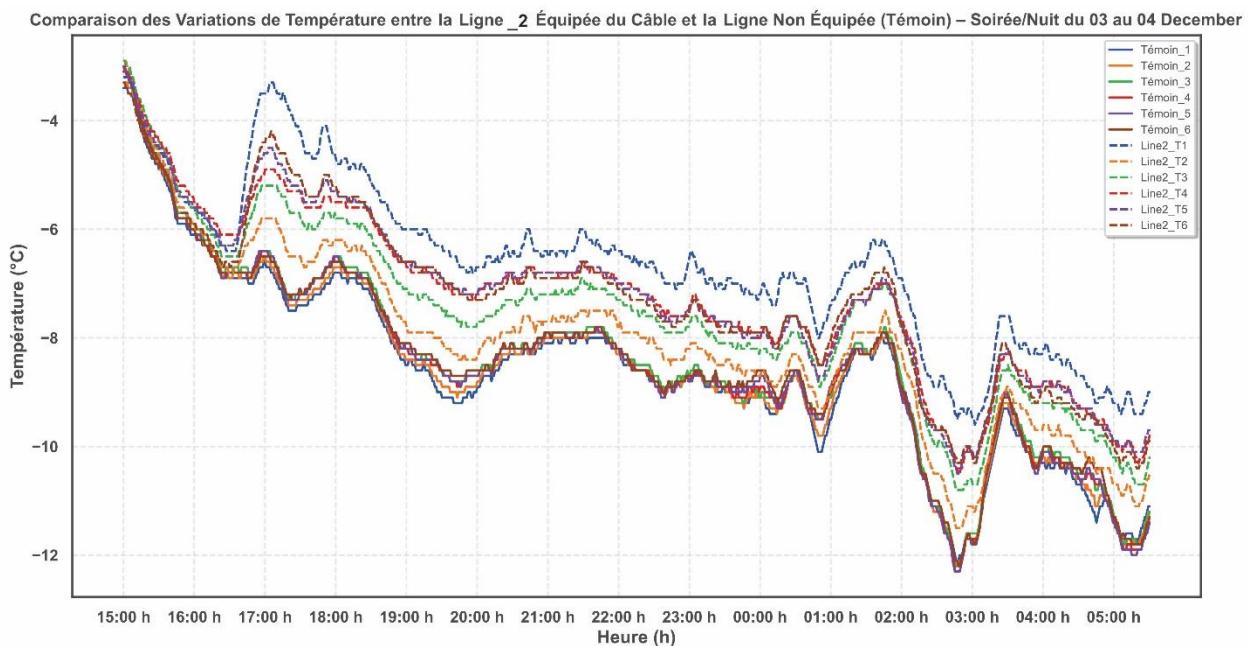


Figure 12. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Frolight et Témoin (soirée/nuit du 3 au 4 décembre)

2025-03-12

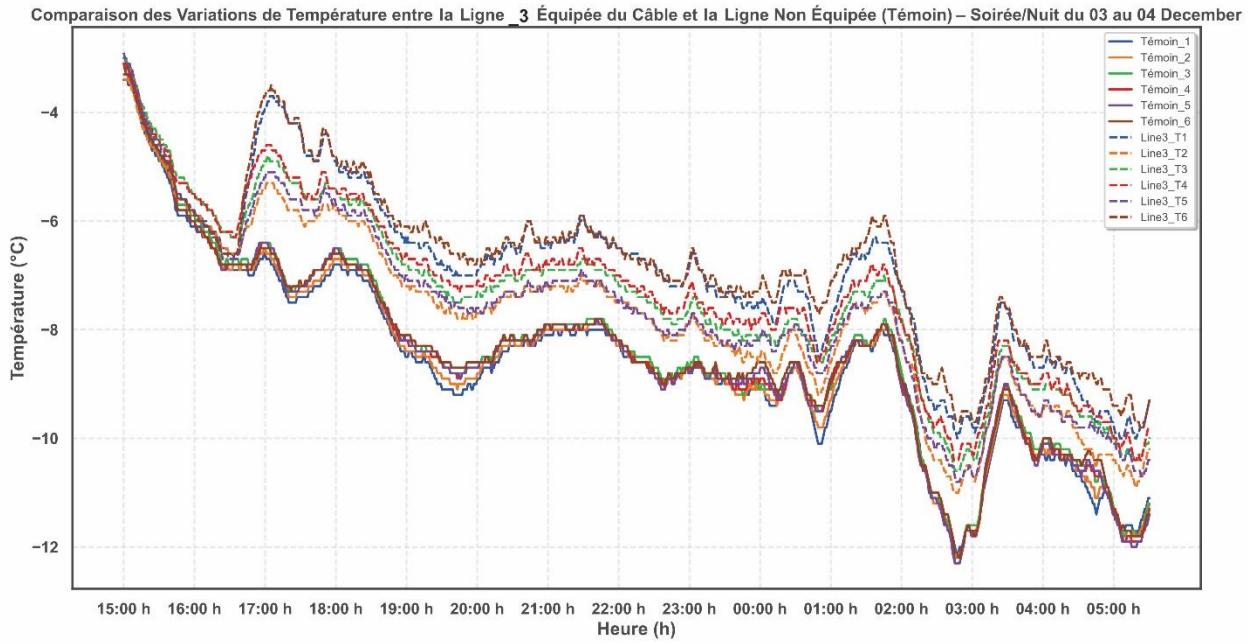


Figure 13. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Frolight et Témoin (soirée/nuit du 3 au 4 décembre)

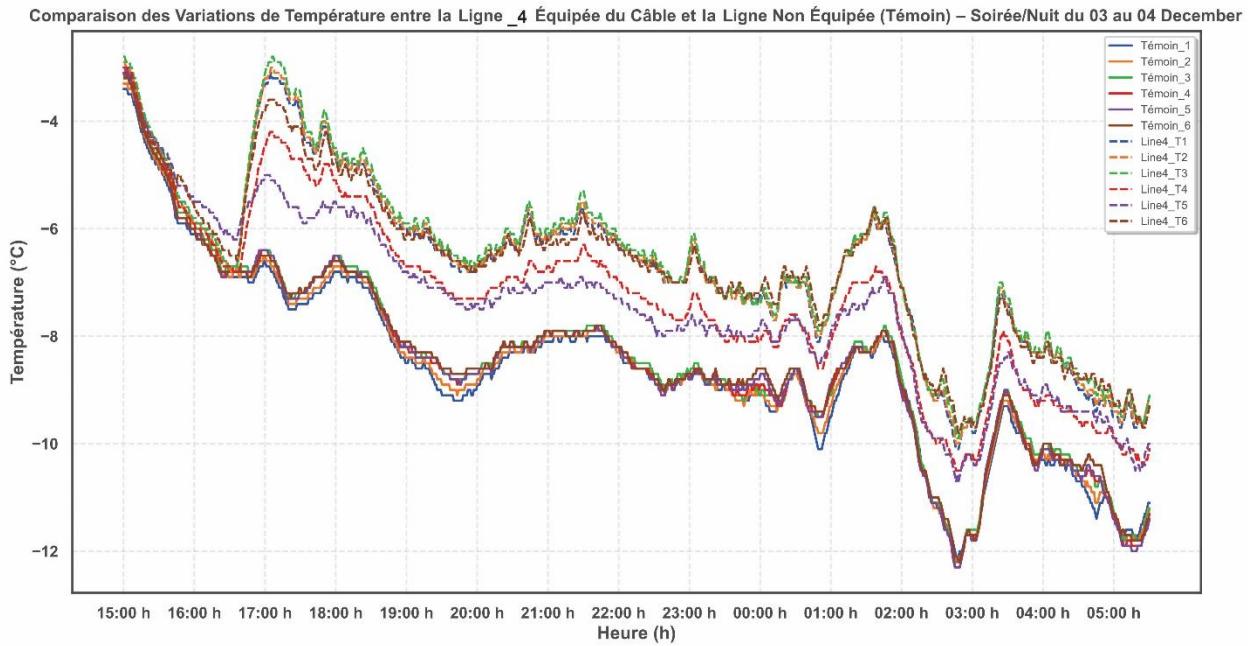


Figure 14. Visualisation comparative des séries temporelles des températures : Lignes Frolight et Témoin (soirée/nuit du 3 au 4 décembre)

3.2 Analyse des données à l'aide de boîtes à moustaches

Dans cette section, nous analysons les données statistiques des températures à l'aide de la méthode des boîtes à moustaches. Les diagrammes présentés illustrent la distribution des températures enregistrées au cours de trois nuits distinctes : du 27 au 28 novembre (Figure 15), du 2 au 3 décembre (Figure 16) et du 3 au 4 décembre (Figure 17). Ces diagrammes comparent quatre lignes équipées d'un câble chauffant (Ligne_1, Ligne_2, Ligne_3 et Ligne_4) à une ligne de référence non équipée (Référence), qui reflète les conditions de température ambiante. Voici les principaux résultats

➤ ***Distribution générale des températures :***

- La ligne de référence (en bleu) affiche les températures les plus basses par rapport aux quatre lignes équipées.
- La médiane de la ligne de référence est inférieure à celle des lignes équipées, ce qui confirme que le système de chauffage Frolight élève la température.

➤ ***Effet du câble chauffant :***

- Toutes les lignes équipées (Ligne_1, Ligne_2, Ligne_3 et Ligne_4) présentent une médiane de température supérieure à celle de la ligne de référence, démontrant l'efficacité du système de chauffage.
- L'étendue des températures (distance entre les valeurs minimales et maximales) est plus large pour les lignes équipées, ce qui indique une distribution de la chaleur moins uniforme.

➤ ***Variation et dispersion des températures :***

- La ligne de référence montre une plage interquartile (IQR) plus étroite, signe d'une moindre dispersion autour de la médiane. L'IQR, défini comme l'écart entre le premier quartile (Q1, 25^e percentile) et le troisième quartile (Q3, 75^e percentile), reflète une stabilité relative des températures ambiantes.

- En revanche, les lignes équipées du câble Frolight affichent une IQR plus large, suggérant une variabilité accrue des températures, potentiellement liée à des fluctuations dans l'apport de chaleur.
- Des valeurs aberrantes (outliers) sont observées dans tous les diagrammes, particulièrement pour la ligne de référence. Ces anomalies témoignent des variations naturelles de la température ambiante.

➤ ***Comparaison entre les lignes équipées :***

- Line_1 (orange) affiche la médiane de température la plus élevée, ce qui suggère qu'elle bénéficie plus fortement de l'effet du câble chauffant.
- Line_4 (violet) se distingue par une dispersion importante des températures, reflétant des variations plus marquées dans son comportement thermique.
- Line_2 (vert) et Line_3 (rouge) présentent des médianes similaires, mais leurs distributions diffèrent légèrement, indiquant des réponses distinctes au chauffage malgré des valeurs centrales proches.

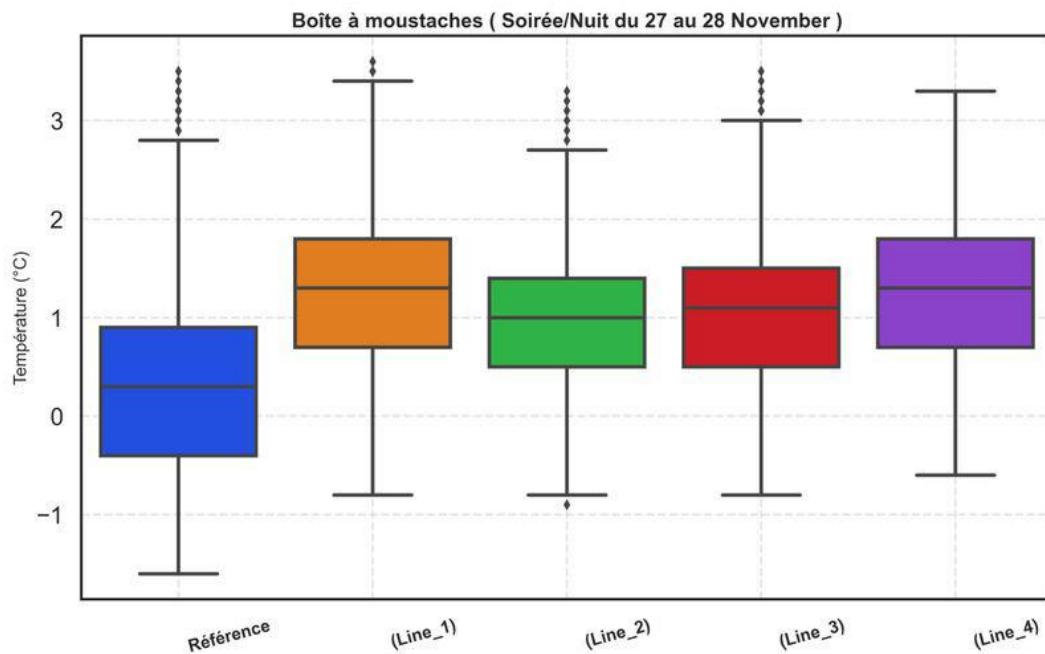


Figure 15. Résultats de l'analyse statistique par boîte à moustaches, comparant les températures de quatre lignes équipées à celles d'une ligne de référence (soirée/nuit du 27 au 28 novembre).

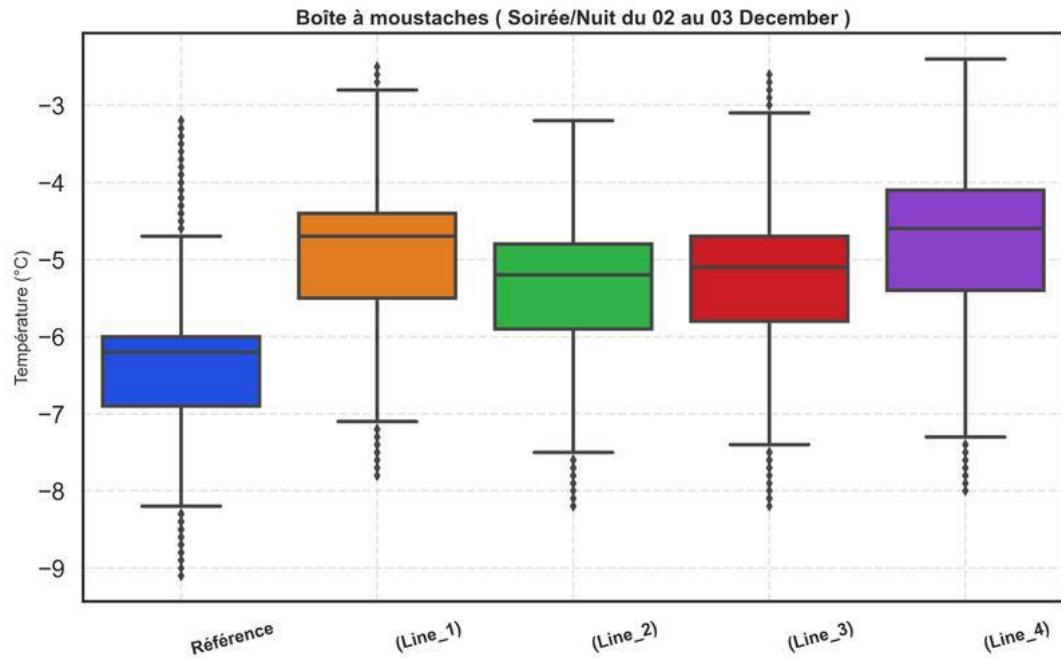


Figure 16. Résultats de l'analyse statistique par boîte à moustaches, comparant les températures de quatre lignes équipées à celles d'une ligne de référence (soirée/nuit du 2 au 3 décembre).

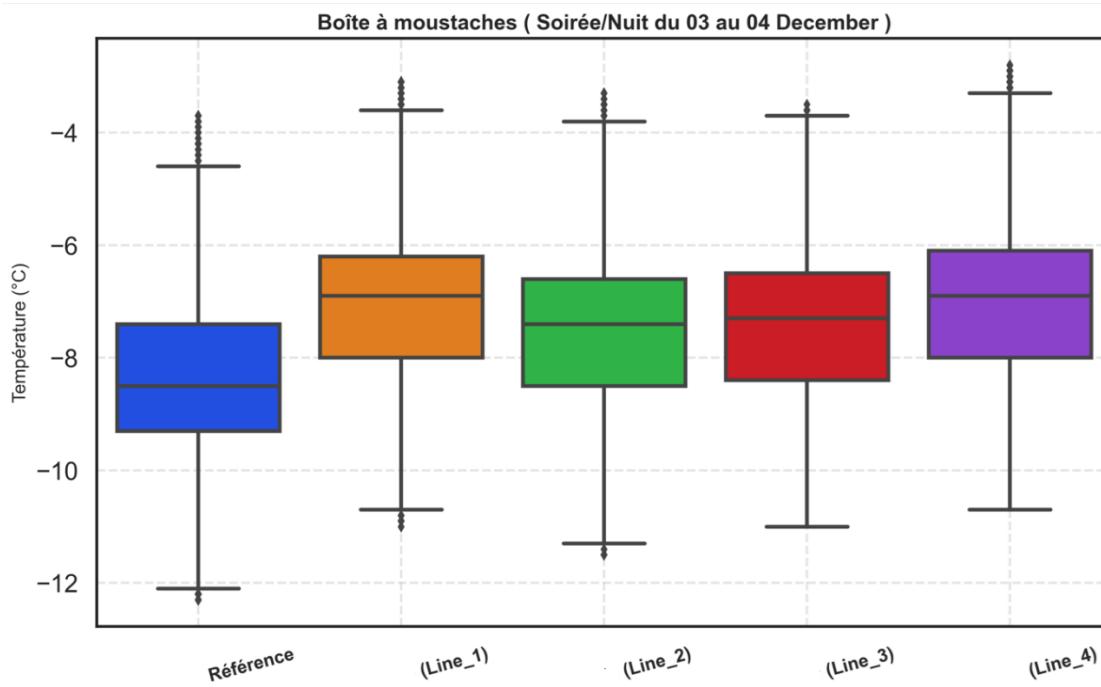


Figure 17. Résultats de l'analyse statistique par boîte à moustaches, comparant les températures de quatre lignes équipées à celles d'une ligne de référence (soirée/nuit du 3 au 4 décembre).

3.3 Étude des Variations Temporelles des Températures Moyennes : Comparaison des Lignes Frolight et Témoin

Dans cette section, nous nous concentrons sur l'analyse comparative des variations temporelles des températures moyennes entre quatre lignes équipées de câbles Frolight et une ligne de référence. La température moyenne de chaque ligne est calculée à partir des mesures de six thermomètres installés à intervalles réguliers de 5 mètres le long de chaque ligne (comme illustré dans la Figure 2) avec un enregistrement synchronisé des températures toutes les 60 secondes.

3.3.1 Résultats de la soirée/nuit du 27 au 28 novembre

Figure 18, illustre la variation des valeurs moyennes de température au cours de la nuit du 27 au 28 décembre. La Figure présent lors de la nuit du 27 au 28 novembre, vers 20h50, une chute rapide et significative de la température de plus d'un degré a été observée. Toutefois, le taux de refroidissement des lignes équipées du système Frolight était plus faible que celui de la ligne de référence, représentative de la température ambiante. Après cette baisse, la température moyenne des quatre lignes est restée constamment supérieure à celle de la ligne de référence, suggérant que le système Frolight nécessite un certain temps afin d'atteindre son efficacité optimale.

Variation de la température moyenne des lignes équipées de câbles et de la ligne de référence
(Soirée/Nuit du 27 au 28 November)

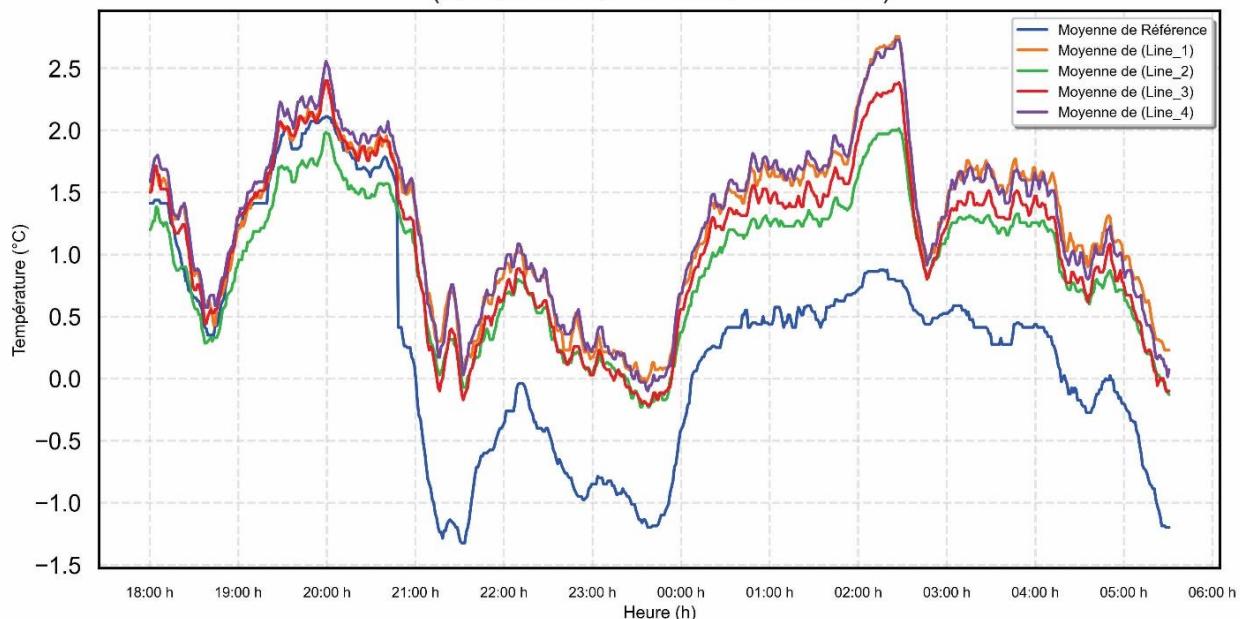


Figure 18. Illustré la variation des valeurs moyennes de température pour les quatre lignes équipées de câbles Frolight et la ligne de référence (Soirée/Nuit du 27 au 28 Novembre).

3.3.2 Résultat de la soirée/nuit du 2 au 3 décembre

Figure 19 illustre la variation des valeurs moyennes de température au cours de la nuit du 2 au 3 décembre. Il est important de noter que la vitesse du vent a fluctué pendant cette période, passant d'environ 9 km/h à 17 h le 2 décembre à environ 2 km/h entre 21 h et 6 h le lendemain. Le graphique met en évidence une différence de température moyenne d'environ 2 à 3 °C entre les lignes équipées et le Témoin, avec un effet thermique notable à partir de 20h00-21h00, cohérent avec un délai d'activation signalé dans votre texte.

Les résultats indiquent que le système Frolight est efficace lorsque les conditions sont calmes, c'est-à-dire lorsque la vitesse du vent est inférieure à 3 km/h. En revanche, comme le montre la figure 3, dans des conditions météorologiques où la vitesse du vent dépasse 5 km/h, on n'observe pas de différence notable entre les lignes équipées du système Frolight et la ligne de référence. Le graphique met en évidence une différence de température moyenne d'environ 2 à 3 °C entre les lignes équipées et le Témoin.

Variation de la température moyenne des lignes équipées de câbles et de la ligne de référence
(Soirée/Nuit du 02 au 03 December)

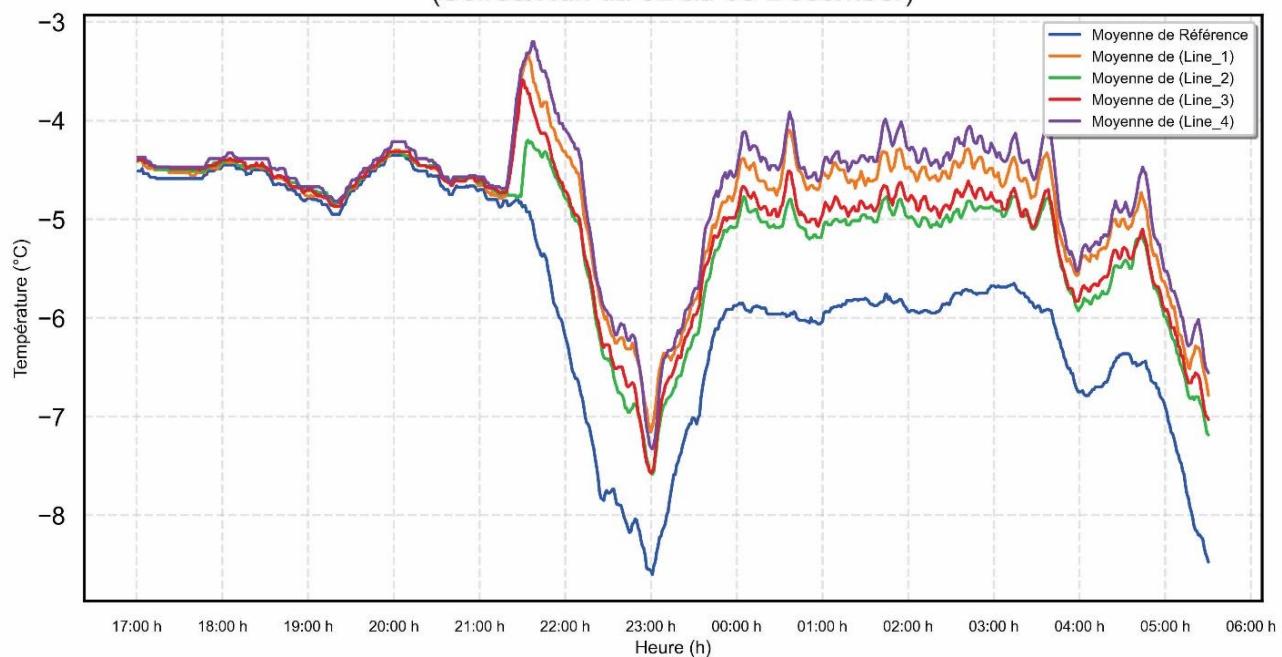


Figure (19). Illustré la variation des valeurs moyennes de température pour les quatre lignes équipées de câbles Frolight et la ligne de référence (Soirée/Nuit du 02 au 03 Décembre).

3.3 Résultat de la soirée/nuit du 3 au 4 décembre

Figure 20, illustre la variation des valeurs moyennes de température durant la nuit du 3 au 4 décembre, période au cours de laquelle le système a été activé une heure avant le coucher du soleil. Par rapport aux tests précédents, le système Frolight a donc été mis en marche plus tôt. Le diagramme montre qu'après 16 h 30, un gradient de température quasi constant s'établit entre les lignes équipées de câbles et la ligne de référence, avec un écart compris entre 0,75 °C et 1,00 °C. Il est à noter que la température minimale observée pour la ligne de référence est de -12 °C, tandis que celle des lignes équipées du système Frolight est de -10,3 °C.

Variation de la température moyenne des lignes équipées de câbles et de la ligne de référence
(Soirée/Nuit du 03 au 04 December)

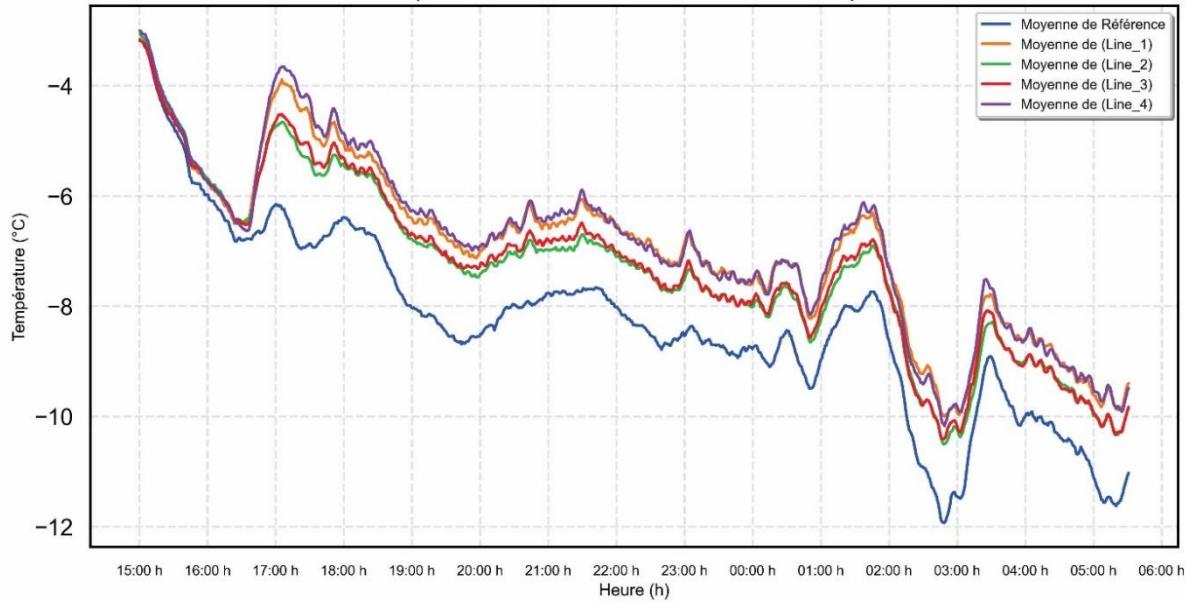


Figure 20. La variation des valeurs moyennes de température pour les quatre lignes équipées de câbles Frolight et la ligne de référence (Soirée/Nuit du 03 au 04 décembre).

Les résultats de 3 soirée/nuit de tests indiquent que, lors des périodes de températures plus chaudes, la différence entre la moyenne générale et les lignes équipées est plus marquée qu'au cours des soirées plus froides.

3.4 Analyse des Effets Thermiques du Système Frolight par la Technique de Kruskal-Wallis

Pour approfondir la comparaison des distributions des températures mesurées sur les quatre lignes équipées du câble chauffant Frolight avec celles de la ligne de référence non équipée, nous avons utilisé le test de Kruskal-Wallis. Ce test a été choisi car l'analyse des données indique qu'elles ne suivent pas une distribution normale. De plus, il permet de comparer plus de deux groupes indépendants afin de déterminer s'il existe des différences statistiquement significatives entre eux.

3.4.1 Résultats du Test de Kruskal-Wallis pour la Soirée/Nuit du 27 au 28 novembre 2024

Nous avons appliqué le test de Kruskal-Wallis pour comparer les distributions des températures des quatre lignes équipées du système Frolight à la ligne de référence non équipée (Témoin) lors de la soirée du 27 novembre. Les données, collectées sur un échantillon de 771 observations par groupe, sont présentées dans le Tableau 1 et Tableau 2. Le Tableau 1 et 2 résume les résultats de l'analyse statistique, incluant le test de Kruskal-Wallis. Les résultats confirment que les températures médianes des quatre lignes équipées du système Frolight sont statistiquement significativement plus élevées que celle de la ligne de référence non équipée.

Les médianes des lignes équipées varient de 1,0 °C (Ligne_2) à 1,3 °C (Ligne_1 et Ligne_4), contre 0,1 °C pour Témoin, démontrant l'efficacité du système Frolight pour augmenter les températures. La plus grande différence observée avec Ligne_4 et Ligne_1, toutes deux présentant une médiane de 1,3 °C, suggère une performance thermique similaire et optimale pour ces lignes, bien que des variations subsistent, comme indiqué par les rangs moyens et les distributions des boîtes à moustaches.

Ces résultats permettent de rejeter l'hypothèse nulle ($p < 0,05$), indiquant l'existence de différences statistiquement significatives entre les distributions des températures des groupes analysés. Cela suggère que les températures des lignes équipées du système Frolight diffèrent significativement de celles de la ligne de référence non équipée.

Table 1 : Résultats du test de Kruskal –Wallis (Soirée/Nuit du 27 au 28 Novembre)

Groupe	Médiane (°C)	Somme des Rangs	Effectif	Rang Moyen	Alpha	Statistique kw	p-value
Témoin	0,1	573867	771	744,3	0,05	1184,812	0,0000
Ligne_1	1,3	1846273	771	2394,6			
Ligne_2	1,0	1507394	771	1955,1			
Ligne_3	1,1	1635530	771	2121,3			
Ligne_4	1,3	1869377	771	2424,6			

Pour approfondir l'analyse, des comparaisons par paires ont été effectuées entre la ligne Témoin et chacune des lignes équipées. Les résultats, présentés dans le tableau 2, montrent les différences entre les rangs moyens :

Table 2 : Résultats de comparaison par paire

Comparaison	Différence entre Paires	Valeur Critique	Différence Significative
Témoin avec Ligne_1	1650,3	154,6	Oui
Témoin avec Ligne_2	1210,8	154,6	Oui
Témoin avec Ligne_3	1377,0	154,6	Oui
Témoin avec Ligne_4	1680,3	154,6	Oui

3.4.2 Résultats du Test de Kruskal-Wallis pour la Soirée/Nuit du 2 au 3 Décembre 2024

Nous avons appliqué le test de Kruskal-Wallis pour comparer les distributions des températures des quatre lignes équipées du système Frolight (Line_1, Line_2, Line_3 et Line_4) à la ligne de référence non équipée (Témoin) lors de la soirée/nuit du 2 au 3 novembre. Les données, collectées sur un échantillon de 521 observations par groupe, sont présentées dans le Tableau 1 ci-dessous, qui résume les résultats de l'analyse statistique.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis confirment que, d'un point de vue statistique, les médianes des températures des quatre lignes équipées du système Frolight sont significativement plus élevées que celle de la ligne de référence (Témoin). Voici les valeurs des médianes observées pour chaque groupe : Témoin : -6,3 °C, Ligne_1 : -4,7 °C, Ligne_2 : -5,1 °C, Ligne_3 : -5,0 °C, Ligne_4 : -4,5 °C.

Ces données montrent que les médianes des lignes équipées varient entre -5,1 °C (Line_2) et -4,5 °C (Line_4), contre -6,3 °C pour la ligne Témoin, démontrant ainsi l'efficacité du système Frolight

pour augmenter les températures pendant cette période. Les plus grandes différences sont observées avec Line_4 (médiane de -4,5 °C) et Line_1 (médiane de -4,7 °C), ce qui met en évidence une performance thermique particulièrement notable pour ces deux lignes.

Table 3 : Résultats du test de Kruskal –Wallis (Soirée/Nuit du 2 au 3 Décembre)

Groupe	Médiane (°C)	Somme des Rangs	Effectif	Rang Moyen	Alpha	Statistique KW	p- value
Témoin	-6,3	288651	521	554,0	0,05	812,077	0,0000
Line_1	-4,7	842904	521	1617,9			
Line_2	-5,1	636596,5	521	1221,9			
Line_3	-5,0	707344,5	521	1357,7			
Line_4	-4,5	918819	521	1763,6			

Table 4 : Résultats de comparaison par paire

Comparaison	Déférence entre Paires	Valeur Critique	Déférence Significative
Témoin avec Ligne_1	1063,8	127,1	Oui
Témoin avec Ligne_2	667,8	127,1	Oui
Témoin avec Ligne_3	803,6	127,1	Oui
Témoin avec Ligne_4	1209,5	127,1	Oui

Ces comparaisons indiquent que toutes les différences entre la ligne Témoin et les lignes équipées dépassent largement la valeur critique de 127,1, confirmant leur significativité statistique.

La statistique de Kruskal-Wallis calculée est de 812,077, avec une valeur de p égale à 0,0000 ($p < 0,05$), ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle. Cela signifie qu'il existe des différences statistiquement significatives entre les distributions des températures des groupes analysés. Par conséquent, les températures des lignes équipées du système Frolight diffèrent de manière notable de celles de la ligne de référence non équipée.

3.4.3 Résultats du Test de Kruskal-Wallis pour la Soirée/Nuit du 3 au 4 Décembre 2024

Nous avons appliqué le test de Kruskal-Wallis pour comparer les distributions des températures des quatre lignes équipées du système Frolight (Ligne_1, Ligne_2, Ligne_3 et Ligne_4) à la ligne de référence non équipée (Témoin) lors de la soirée/nuit du 3 au 4 décembre. Les données, collectées sur un échantillon de 789 observations par groupe, sont présentées dans le Tableau 1,

qui résume les résultats de l'analyse statistique. Les résultats du test de Kruskal-Wallis permettent de rejeter l'hypothèse nulle ($p < 0,05$), avec une statistique de 640,199 et une valeur de p de 0,0000, indiquant l'existence de différences statistiquement significatives entre les distributions des températures des groupes analysés. Cela suggère que les températures des lignes équipées du système Frolight diffèrent significativement de celles de la ligne de référence non équipée au cours de cette période. Pour identifier les différences spécifiques entre les groupes, une analyse post-hoc a été réalisée. Les différences par paires, basées sur les rangs moyens et comparées à une valeur critique de 156,4, sont détaillées comme suit :

Ces comparaisons confirment que, d'un point de vue statistique, les médianes des températures des quatre lignes équipées du système Frolight sont significativement plus élevées que celle de la ligne de référence non équipée. Les médianes des lignes équipées varient de -7,0 °C (Ligne_4) à -7,5 °C (Ligne_2 et Ligne_3), contre -8,8 °C pour Témoin, démontrant l'efficacité du système Frolight pour augmenter les températures dans des conditions de froid plus intense. La plus grande différence observée avec Ligne_4 (médiane de -7,0 °C) et Ligne_1 (médiane de -7,1 °C) indique une performance thermique notable pour ces lignes, bien que des variations subsistent, comme reflété par les rangs moyens et les distributions des boîtes à moustaches.

Table 5 : Résultats du test de Kruskal –Wallis (Soirée/Nuit du 3 au 4 Décembre)

Groupe	Médiane (°C)	Somme des Rangs	Effectif	Rang Moyen	Alpha	Statistique KW	p- value
Témoin	-8,8	884353,5	789	1120,9	0,05	640,199	0,0000
Line_1	-7,1	1861390	789	2359,2			
Line_2	-7,5	1547642	789	1961,5			
Line_3	-7,5	1604796	789	2034,0			
Line_4	-7,0	1885305	789	2389,5			

Table 6 : Résultats de comparaison par paire

Comparaison	Différence entre Paires	Valeur Critique	Différence Significative
Témoin avec Ligne_1	1238,3	156,4	Oui
Témoin avec Ligne_2	840,7	156,4	Oui
Témoin avec Ligne_3	913,1	156,4	Oui
Témoin avec Ligne_4	1268,6	156,4	Oui

L'analyse post-hoc montre que toutes les différences entre la ligne Témoin et les lignes équipées dépassent la valeur critique de 156,4, confirmant leur significativité statistique. Cette efficacité du système Frolight dans des conditions de froid intense (-8,8 °C pour Témoin vs. -7,0 °C à -7,5 °C pour les lignes équipées) est mise en évidence, avec Line_4 et Ligne_1 se distinguant par leurs performances thermiques optimales.

3.4 Évaluation Thermique du Système Frolight par Imagerie Infrarouge

L'évaluation a été enrichie par l'utilisation d'une caméra thermique infrarouge. Alors que les thermomètres mesurent la température de l'air, reflétant ainsi les conditions météorologiques, l'imagerie infrarouge permet de détecter les micro-variations thermiques au niveau des rameaux de vigne, offrant un aperçu direct de leur état biologique.

Le système Frolight, conçu pour agir à une échelle micro, se distingue nettement des méthodes actives telles que les turbines à vent, qui interviennent à une échelle macro plus large. L'imagerie infrarouge fournit une évaluation directe de l'impact du câble sur la température des rameaux à micro-échelle.

Figure 21 présente une image de thermographie infrarouge illustrant la distribution des températures le long d'un câble, vraisemblablement celui du système Frolight, avec onze régions d'intérêt (ROI) étiquetées de L1 à L11. Le traitement des images et l'analyse statistique ont été réalisés à l'aide du logiciel Vario-Analyze Pro.

Les valeurs moyenne, maximale, minimale et l'écart-type ont été estimées pour 11 petites zones situées à différentes positions. Le tableau ci-dessous fournit des données statistiques pour chaque ROI, incluant les températures moyennes, minimales (Min), maximales (Max) et l'écart-type.

Les moyennes varient de -2,1 °C à 1,6 °C, avec des maximums atteignant 2 °C. L'émissivité (Eps), fixée à 1,00 pour toutes le ROI, indique des propriétés de surface uniformes. Ces résultats soulignent l'efficacité du chauffage localisé du câble Frolight à une échelle micro, tout en mettant en évidence des variations thermiques significatives sur de courtes distances. Par exemple, la Figure 20 montre une imagerie infrarouge qui révèle une distribution thermique distincte et améliorée sur les côtés proches du câble par rapport aux branches plus éloignées.

Les résultats montrent que, malgré une faible distance entre chaque zone (10 cm au maximum), une différence de 0,7 °C est observée entre le point le plus proche du câble et le plus éloigné. De plus, l'image met en évidence une efficacité accrue du câble pour les branches situées au-dessus de celui-ci par rapport à celles positionnées en dessous.

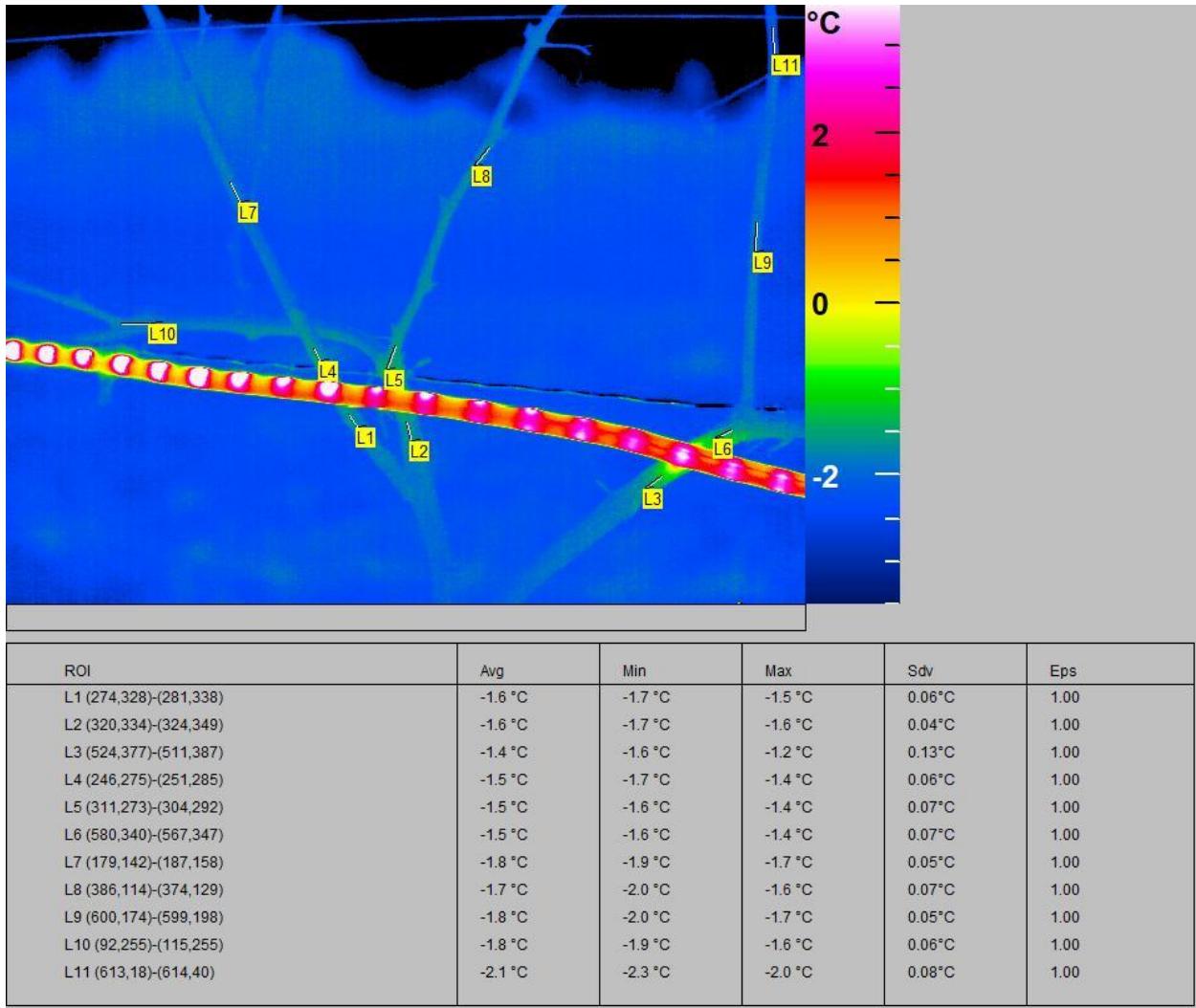


Figure 21. Thermographie infrarouge de la distribution des températures le long du câble Frolight avec analyse des régions d'intérêt (ROI). Eps représentant l'émissivité.

Figure 22, présente une image de thermographie infrarouge illustrant la distribution des températures le long d'un câble, présumé être celui du système Frolight, avec six régions d'intérêt

(ROI) étiquetées de R1 à R6. Le tableau accompagnant fournit des données statistiques pour chaque ROI, incluant les températures moyennes, minimales, maximales et l'écart-type, avec des moyennes variant de -3,1 °C à -0,4 °C, et des maximums atteignant 0 °C à 2,8 °C. La valeur constante d'émissivité (Eps) de 1,00 pour toutes le ROI suggère des propriétés de surface uniformes. Ces résultats mettent en évidence l'effet de chauffage localisé du câble, cohérent avec l'action à l'échelle micro du système Frolight, et soulignent l'importance d'une installation précise pour une performance optimale.

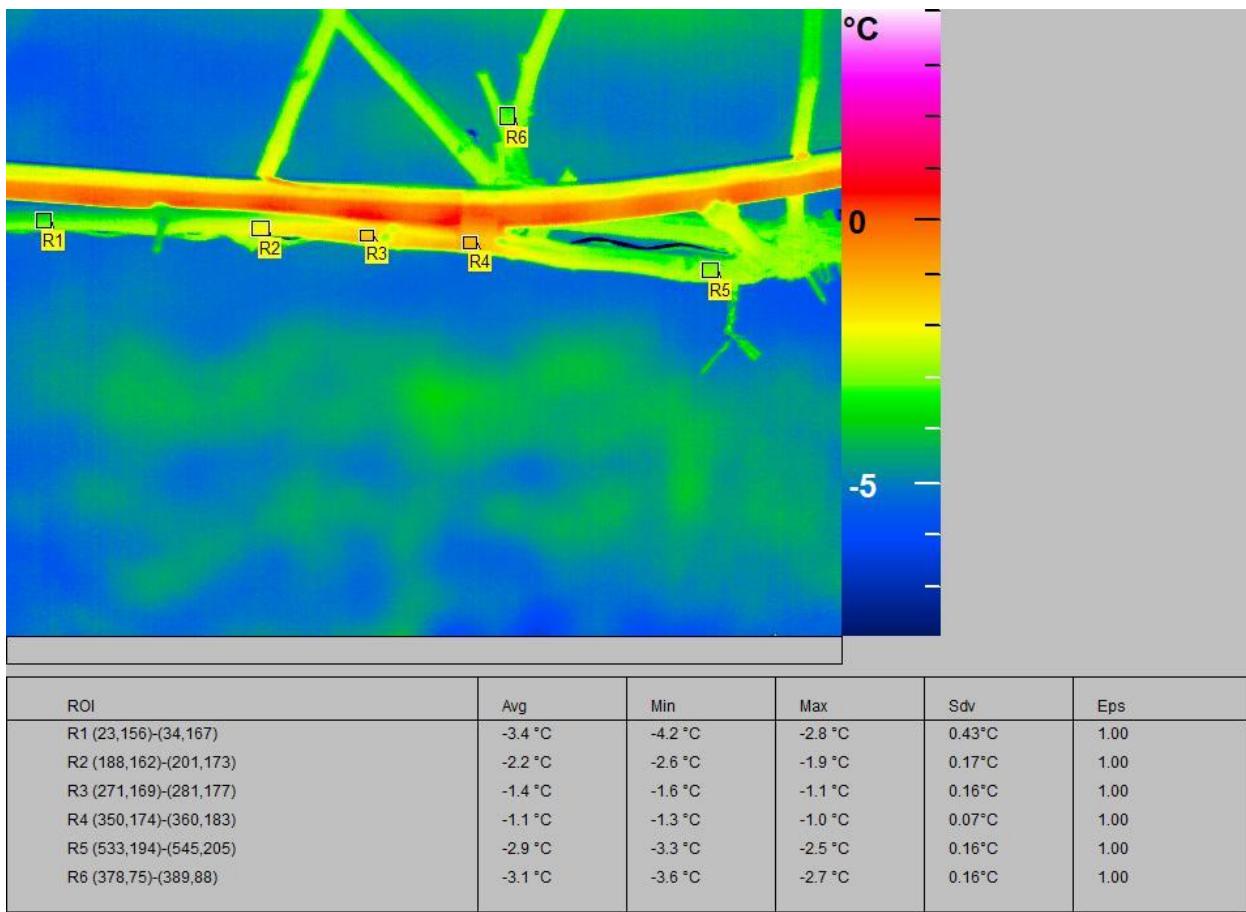


Figure 22. Thermographie infrarouge de la distribution des températures le long du câble Frolight avec analyse des régions d'intérêt (ROI). Eps représentant l'émissivité.

Figure 23 présente une image de thermographie infrarouge avec six régions d'intérêt (ROI) étiquetées de R1 à R6. Le tableau ci-dessous fournit des données statistiques Les moyennes varient de -0,6 °C à 1,0 °C, avec des maximums atteignant 1,4 °C. L'émissivité (Eps), fixée à 1,00 pour toutes les ROI, indique des propriétés de surface uniformes.

Ces résultats mettent en évidence l'efficacité du chauffage localisé du câble Frolight à une échelle micro, avec des variations thermiques notables sur de courtes distances. Par ailleurs, l'image montre que les parties situées sous le câble (R1, R2 et R3) sont plus froides que celles situées au-dessus (R4, R5 et R6), soulignant une distribution thermique asymétrique autour du câble.

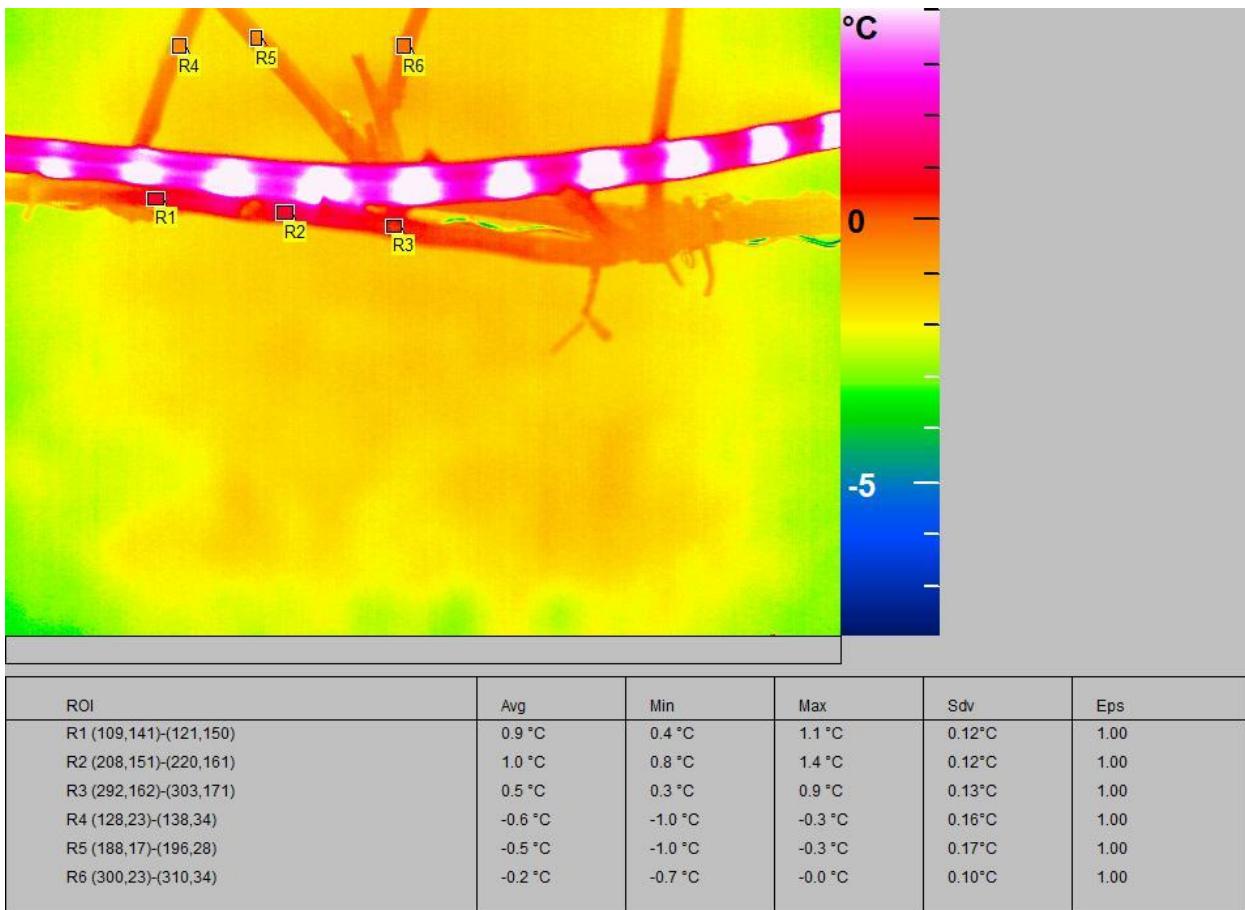


Figure 23. Thermographie infrarouge de la distribution des températures le long du câble Frolight avec analyse des régions d'intérêt (ROI). Eps représentant l'émissivité.

Conclusion

Cette recherche présente des analyses multi-sensorielles intégrant des thermomètres et l'imagerie infrarouge. En effet, l'intégration de 30 thermomètres pour l'enregistrement synchronisé des données de température à haute résolution spatiale et temporelle, combinée à l'imagerie infrarouge, nous permet d'obtenir une compréhension plus complète des effets du système Frolight.

Les principaux résultats et observations sont présentés ci-dessous.

- Les lignes équipées du câble Frolight (Ligne_1 à Ligne_4) présentent des températures systématiquement supérieures à celles de la ligne de référence non équipée.
- Les différentes méthodes d'évaluation, combinées aux résultats de l'imagerie infrarouge, confirment que les températures des lignes équipées du câble Frolight sont différentes et plus élevées que celles de la ligne témoin.
- Le test de Kruskal-Wallis confirme que ces différences sont statistiquement significatives.
- La différence de température entre les lignes équipées et la ligne témoin varie en fonction de la température ambiante : elle est de **3 °C** lorsque celle-ci dépasse 0,5 °C, de **2,4 °C** entre -0,5 °C et -2 °C, **de 1,5 °C** entre -4 °C et -8 °C et d'environ **0,9 °C** entre -9 °C et -12 °C.
- À des températures critiques avoisinant -12 °C, le système parvient à augmenter la température de l'air d'environ 1 °C, une performance notable par rapport à d'autres méthodes de protection contre le gel, qu'elles soient actives ou passives.

Lors de notre essai terrain le système Frolight ne fonctionne pas pleinement comme prévu. En effet, le système s'est éteint et s'est allumé de manière inappropriée, même lorsque la température ambiante était inférieure à celle programmée. Dans ces cas-là, toutes les lignes s'arrêtaient et se rallumaient simultanément.

Nous croyons que le positionnement du capteur a influencé grandement les dérèglements. Pour activer le système, Frolight utilise des capteurs de température connectés aux unités de contrôle IR.

Le positionnement d'un capteur ou d'un senseur dans un système automatisé, joue un rôle crucial pour assurer la précision, la fiabilité et l'efficacité de l'ensemble du processus. Un capteur mal positionné peut entraîner des erreurs de mesure, des dysfonctionnements ou une diminution des performances du système.

Le capteur ou senseur qui enclenche ou pas le système doit être bien positionné afin de représenter les conditions présentes dans le vignoble et doivent être en nombre suffisant. C'est d'autant plus important si l'on utilise le système Frolight pour une superficie importante ou pour un vignoble avec une topographie variable.

De plus, le cycle d'allumage et de fermeture des câbles aggrave la situation : Une période semble nécessaire lors de l'ouverture du système afin de permettre au câble d'atteindre sa température, cette réalité doit être anticipée par l'utilisateur. À moins qu'un ajustement soit possible par le fabricant résultant une régulation plus précise et adaptée aux conditions réelles.

Néanmoins, les résultats confirment l'uniformité thermique du câble chauffant sur l'ensemble de sa longueur et suppose, sous toute réserve aucun enjeu sur une longueur plus importante que celle utilisé dans l'essai. À titre d'exemple, la température relevée au 5^e mètre est comparable à celle du 25^e mètre, soulignant une répartition homogène de la chaleur. Les petites différences de température constatées le long d'une même ligne sont, là encore, principalement dues à des influences environnementales externes, comme la microtopographie, plutôt qu'à des irrégularités dans le fonctionnement du câble. Ainsi, il peut arriver que la température au 20^e ou 25^e mètre soit légèrement supérieure à celle mesurée au 5^e mètre.

Les résultats de l'imagerie infrarouge confirment que l'influence du système Frolight repose sur une action ciblée à l'échelle micro. En effet, les images révèlent une distribution thermique plus distincte et améliorée sur les côtés proches du câble par rapport aux branches plus éloignées. Ce mécanisme, fondamentalement différent de celui des turbines à vent ou de l'irrigation, qui agissent à une échelle plus large et de manière non ciblée, met en évidence l'importance d'une installation

optimale. Par conséquent, il est fortement recommandé de veiller à une pose précise du câble sur chaque centimètre de sa longueur.

En guise de recommandation, cette étude met en lumière la nécessité de recherches supplémentaires visant à optimiser l'utilisation de la méthode du câble Frolight pour la protection contre le gel tout en maximisant son efficacité. Cela pourrait être accompli en menant une étude dédiée à l'amélioration de l'impact thermique du câble, afin d'accroître le rendement global de cette méthode et de garantir l'atteinte de son plein potentiel.

Remerciement :

MAPAQ | Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
Direction régionale de la Capitale-Nationale, de la Chaudière-Appalaches

Oak Leaf Inc. Représentant du système Frolight

Vignoble Domaine Small, Sainte-Agathe-de-Lotbinière (Chaudière-Appalaches)

