

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec



Le contrôle des gels radiatifs dans un vignoble de Chaudière-Appalaches : validation de concept



Vahid Ikani, PhD, Consultant en agrométéorologie

Raymond D. Lambert, DSc biochimie, vigneron

Août 2022

1. Introduction


Les résultats obtenus lors du projet de recherche « Analyse des éléments climatiques - environnementaux et de leurs influences sur la formation et sur l'intensité du gel radiatif dans un vignoble de Chaudière-Appalaches » ont conduit à un plan d'action visant à tenter de contrer les gels tardifs et hâtifs. Ce plan d'action tourne principalement autour du recours à l'entropie humide pour atteindre cette protection, car l'humidité de l'air impacte directement la formation de gels radiatifs (Paulo et al., 2005). Mais, avant une application généralisée sur tout le vignoble, ce concept devait être validé, ce qui fut fait au printemps 2022. À cet effet, un générateur de vapeur, ou générateur d'entropie humide, a été mis point au vignoble Clos Lambert (prototype Clos Lambert), puis testé sur le terrain en condition de gel radiatif et comparé à une simple marmite agissant aussi comme générateur d'entropie humide.

Outre cet objectif général de validation de concept, les trois objectifs spécifiques de ce projet étaient de déterminer :

- 1) La vitesse de diffusion de la vapeur et la rapidité avec laquelle s'installe la protection contre le gel après la mise en marche de ces générateurs ; ceci devait nous permettre de déterminer combien de temps avant un gel prévu, les générateurs d'entropie humide devraient être installés.
- 2) La superficie couverte par chacun des générateurs d'entropie humide ; ceci devait nous permettre de déterminer combien de générateurs seraient nécessaires pour assurer une bonne protection sur l'ensemble du vignoble.
- 3) La durée de la protection après l'arrêt des générateurs; ceci devait nous permettre de déterminer combien de temps avant la fin prévue d'un épisode de gel radiatif, les générateurs pourraient être éteints.

Il faut noter que cette approche diffère de ce qui est proposé actuellement en milieu agricole où on tente de contrer les gels radiatifs sévères (pour plus d'information consulter le bulletin suivant: [GEL PRINTANIER ET MÉTHODES DE PROTECTION](#)). Dans la majorité des travaux publiés sur les gels radiatifs on se limite en effet à mesurer la température de l'air ; ici nous considérons trois variables atmosphériques : la température, le point de rosée, et l'entropie. Tous les essais dont il est question dans ce rapport ont été réalisés au vignoble Clos Lambert en Chaudière-Appalaches. Ce vignoble a subi des pertes importantes liés au gel au cours des années précédentes.

2. Méthodologie

La méthode utilisée repose essentiellement sur la cueillette des données temporelles fournies par des réseaux de sondes météorologiques (Fig. 1). On y voit des cercles rouges montrant la position de sondes dans la section (A) où fut installé le prototype conçu au Clos Lambert et les cercles bleus montrant la position des sondes où on a installé la simple marmite. Le signe  montre la position des sondes légèrement à l'extérieur du vignoble et qui ont permis d'établir les valeurs références en vue de les comparer aux données provenant des secteurs de la simple marmite et du prototype Clos Lambert. Le projet a été réalisé le 6-7 mai 2022, puisque les prévisions météo prévoyaient pour cette soirée/nuit-là, un gel important.

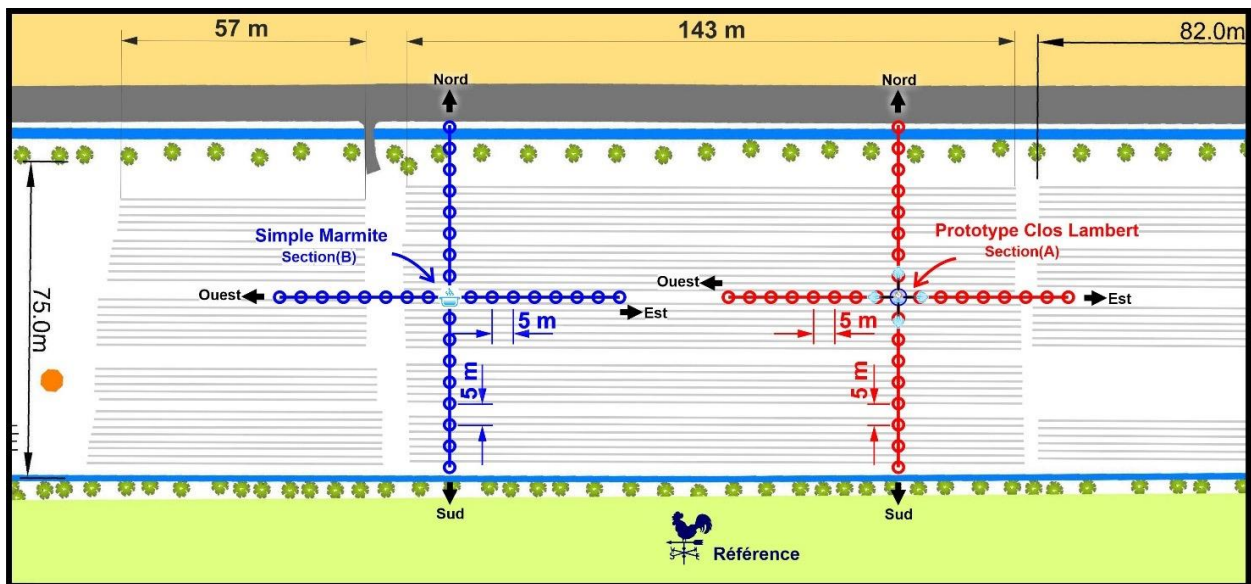


Figure 1. Position des deux générateurs d'entropie humide et configuration des capteurs pour les deux secteurs: A (prototype Clos Lambert en rouge) et B (marmite en bleu) et une station référence. Les cercles rouges montrent la position de sondes dans la section (A) et les cercles bleus montrent celles de la section (B).

Les deux brûleurs (Fig 2 et 3) ont été allumés à 20h, le 6 mai 2022, et 14 minutes plus tard les premiers signes de production de vapeur étaient manifestes. Le vent n'étant tombé que vers 23h00, les mesures rapportées ici sont donc principalement celles ayant été enregistrées entre 23h00 le 6 mai et 01h00 le 7 mai.

La méthodologie comporte trois étapes:

1) La configuration et l'installation des réseaux de capteurs ainsi que des deux brûleurs alimentant les générateurs d'entropie humide, le tout illustré à la Figure 1.

- 2) L'analyse et la présentation des données sur la variation spatiotemporelle de la température, du point de rosée et de l'entropie humide.
- 3) La réalisation des cartes thématiques et des animations (vidéos).

2-1 Installation des réseaux de capteurs et des bouilloires

Deux générateurs d'entropie humide (de vapeur) ont été installés et testés :

- a) Une simple marmite (Figure 2), d'une capacité de 20L, munie d'un couvercle qui ferme le récipient lorsque l'eau atteint l'ébullition de façon à favoriser la diffusion latérale de la vapeur d'eau.



Figure 2. Photo de la simple marmite et des capteurs, en arrière-plan, utilisés dans nos travaux

- b) Un prototype conçu au Clos Lambert (Figure 3) qui tire avantage de la pression à l'intérieur du générateur pour ensuite diffuser la vapeur d'eau. Ce générateur est muni de 4 bras d'une longueur de 5m et chaque bras est garni d'une membrane isolante permettant de réduire les pertes de chaleur lors de la libération de la vapeur d'eau dans l'air.



Figure 3. Photo du prototype conçu au Clos Lambert: une bouilloire de type Presto sur lequel ont été greffés 4 bras d'une longueur de 5m recouverts d'une membrane isolante. On distingue aussi une série de capteurs, à gauche en arrière-plan.

Les deux générateurs d'entropie humide ont été installés à 100m de distance l'un de l'autre et ont été testés simultanément. Ces deux générateurs ont été alimentés par un brûleur de puissance identique (Gaz One, 200 000 BTU) et contenaient le même volume initial d'eau, soit 10L. Durant la soirée, entre 20h le 6 mai et 1h le 7 mai (durée totale de 5h), les réservoirs d'eau (marmite et Presto) ont été ré-alimentés à deux reprises. Ainsi un volume total de 25L d'eau fut transformé en vapeur. La vitesse d'évaporation fut similaire dans les 2 générateurs: 8L/h pour la première heure puis +/- 4L/h pour les 4 heures suivantes.

Les capteurs pour les mesures de température et d'humidité ont été installés à 45cm de hauteur du sol à un intervalle de 5m, et ce pour les 4 points cardinaux: Nord, Sud, Ouest et Est, pour un total de 64 capteurs; une station référence, faite de 2 capteurs posés à 10m du vignoble et distancés de 10m l'un de l'autre (figure 1), et 2 sondes additionnelles positionnées entre les 2 générateurs ont été ajoutées pour un total final de 68 capteurs; ces capteurs ont été laissés sur place jusqu'au 8 mai 2022, soit pendant 3 jours et 2 nuits. Les mesures de température, de point de rosée et d'humidité relative, ont été prises aux 5 minutes, avant, pendant et après la mise en marche des générateurs.

Enfin, la vitesse du vent a fluctué durant la soirée et la nuit du 6-7 mai, passant d'environ 11km/h à 20h le 6 mai à environ 0-5km/h entre minuit et 1h le 7 mai (www.wunderground.com). Le choix de ce site plutôt que celui d'Agrométéo se justifie pour deux raisons: 1) la station météo wunderground la plus proche du vignoble Clos Lambert est située à Lévis alors que les stations Agrométéo les plus proches sont à St-Antoine de Tilly, Ste-Foy et Québec et 2) on ne trouve pas d'information sur les rafales de vent sur Agrométéo, une donnée importante dans le contexte de nos travaux.

2.2 Traitement et analyse des données

Contrairement à la majorité des sondes qui mesurent seulement la température et l'humidité relative, les sondes utilisées dans cet essai mesuraient simultanément trois variables atmosphériques : la température, l'humidité relative, et le point de rosée. C'est cette dernière mesure qui permet le calcul de l'entropie humide à l'aide de la formule (Pauluis and Held, 2002) :

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

Dans cette équation, S est l'entropie humide, 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.

L'analyse des données a été faite de deux différentes façons : une méthode d'analyse quantitative qu'on appelle le *Diagramme en violon* (Violin Plot) et une analyse qualitative basée sur la cartographie des cartes thématiques à partir desquelles on a dérivé les vidéos.

2.2.1 Analyse des données quantitatives

Le modèle nommé *Diagramme en violon* permet de visualiser la distribution des données numériques de différentes variables. Chacun des nuages en forme de violon représente la sommation de toutes les données enregistrées entre 23h le 6 mai et 1h le 7 mai à une distance donnée. Cela représente 25 données/distance des générateurs dans chaque direction à partir desquelles on a pu calculer la valeur médiane et l'écart par rapport à cette dernière valeur.

Même si les diagrammes en forme de violon sont similaires aux diagrammes en boîte (box plots), l'avantage des premiers par rapport aux "box plots" est qu'ils nous permettent de visualiser tant la distribution des données que la probabilité de leur densité. On peut ainsi interpréter le diagramme

de violon comme la combinaison parfaite des diagrammes en boîte (box plot) et des diagrammes de densité "density plots". Ce type de graphique nous permet de savoir si les données sont uni-modales, bi-modales ou même multi-modales. Ces détails, pourtant simples, sont invisibles dans un box plot. Dans un diagramme de violon la distribution peut être vue sur la largeur ce qui rend plus visible les tendances. Pour nos besoins, le modèle de *Diagramme en violon* a été choisi, car, selon nous, il permet une analyse plus adéquate de nos données.

2.2.2 Analyse des données qualitatives

Dans la cadre de nos travaux, nous avons produit quatre vidéos : Une première présente la variation spatiotemporelle de la température de l'air, une seconde illustre cette même variation pour le point de rosée, une troisième montre la variation de l'entropie et, finalement, une quatrième vidéo illustre en temps réel ce qui se passait autour du prototype conçu au Clos Lambert la nuit du 6-7 mai 2022.

3 Résultats

3.1 Le moment du démarrage des générateurs d'entropie humide

Le premier objectif spécifique de nos travaux était de déterminer combien de temps avant l'arrivée d'un gel fallait-il mettre en marche les générateurs d'entropie humide ?

Les figures 4 et 5 permettent de répondre à cette interrogation. Rappelons que les générateurs ont été en fonction de 20h le 6 mai à 1h du matin le 7. On voit à l'évidence, par rapport à la courbe référence, qu'aussi bien la simple marmite (Centre B) que le prototype Clos Lambert (Centre A) ont un effet instantané sur la température et le point de rosée; cet effet a été observé à 50cm environ de distance des générateurs. Il aura fallu attendre 14 minutes après l'allumage des brûleurs au propane pour que la vapeur commence à sortir des générateurs. Comme le montrent les figures 4 et 5, les brûleurs, ayant été allumés à 20h, conduisent immédiatement après l'allumage à une augmentation de la température et du point de rosée. En revanche, à 5m du générateur d'entropie humide (figures 6-9) on n'observe pas d'effets aussi spectaculaires ; en fait, même si le point de rosée est influencé dès 20h15 environ à proximité du prototype du Clos Lambert (figure 8), il faut attendre presque jusqu'à 22h, soit 2h plus tard, pour détecter un effet sur la température (figure 6). Étonnamment, ni la température (figure 7), ni le point de rosée (figure 9) semble être influencé significativement par la vapeur venant de la simple marmite.

3.2 La durée de la protection après l'arrêt des générateurs

Un autre objectif spécifique de nos travaux visait à déterminer combien de temps avant la fin prévue d'un épisode de gel, les générateurs pourraient être éteints.

Les résultats sont également présentés aux figures 4 et 5. Ils montrent qu'à 50 cm des générateurs l'effet bénéfique sur la température et le point de rosée disparaît 15 minutes environ suite à l'arrêt des brûleurs, les brûleurs ayant été éteints à 1h. On observe également à la figure 4 que la température à 50 cm environ du prototype Clos Lambert (ligne rouge) est légèrement inférieure à celle de la simple marmite (ligne bleu) mais qu'après la fermeture des brûleurs le phénomène inverse se produit.

Afin d'approfondir ces effets des générateurs d'entropie humide sur l'air ambiant, nous avons vérifié la variation de la température et du point de rosée à 5 mètres au Nord, au Sud, à l'Ouest et à l'Est des générateurs tel qu'illustré à la figure 1.

Les résultats montrent une chute dramatique de la température, observable principalement pour le prototype Clos Lambert (figures 6 et 8) après l'arrêt des générateurs en directions Sud et Ouest. On peut observer une chute plus modérée en directions Est et Nord. Ces chutes de température surviennent 10-15 minutes après l'arrêt des générateurs. On peut observer des variations similaires pour le point rosé (figures 8 et 9).

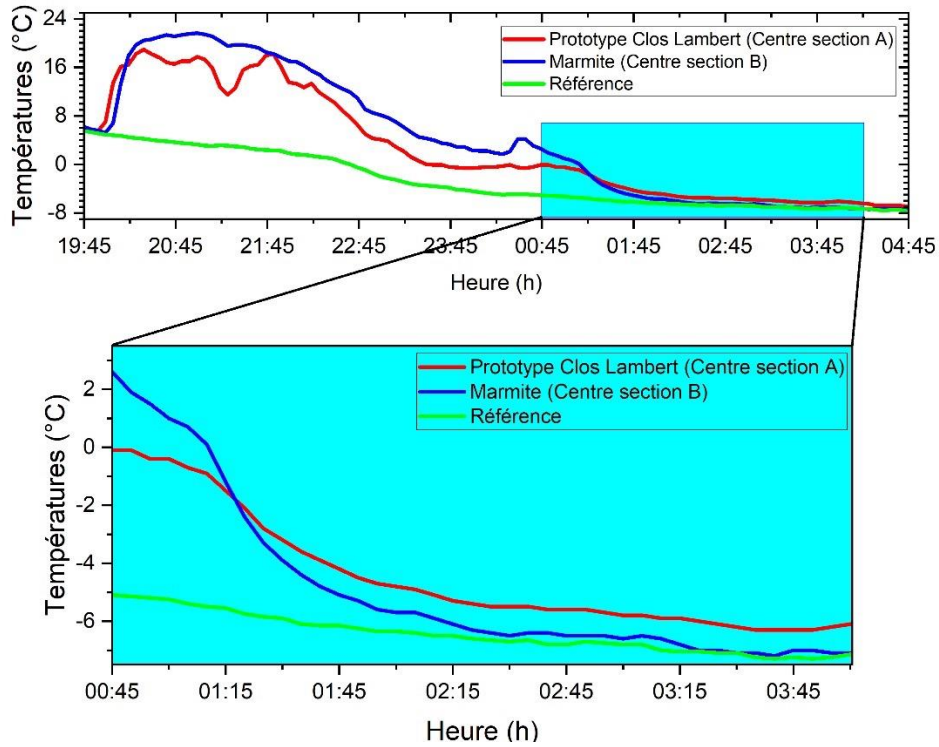


Figure 4. Variation de la température, au point 0 à 50cm du prototype Clos Lambert (Centre A) et de la marmite (Centre B), entre 19h45 le 6 mai (avant le démarrage des brûleurs) et 4h45 le 7 mai (après leur arrêt à 01h00).

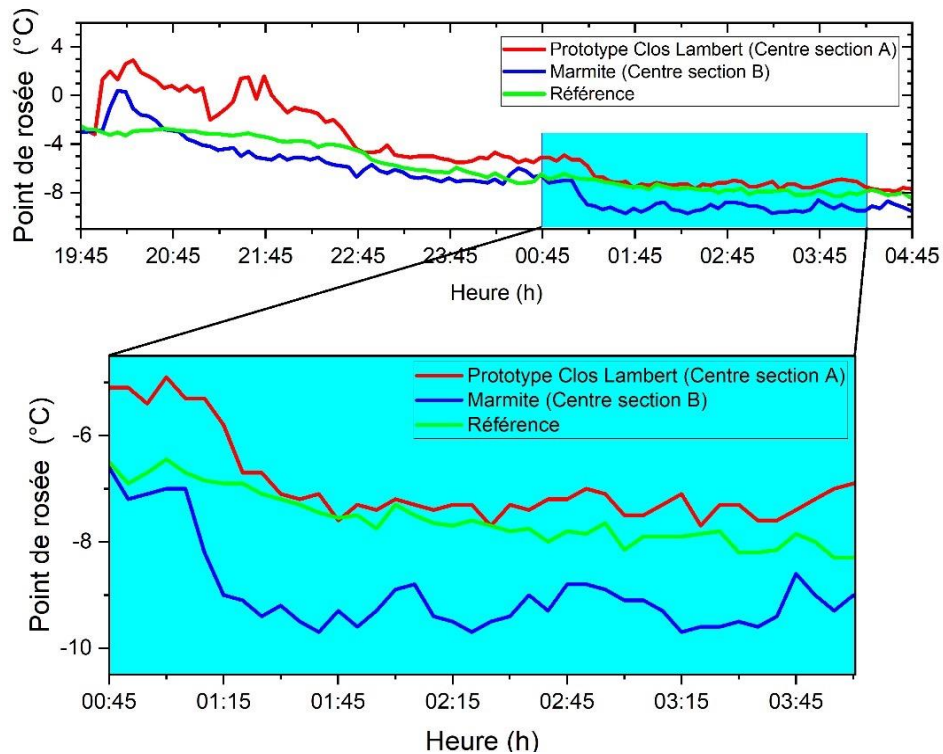


Figure 5. Variation du point de rosée, au point 0 à 50cm du prototype Clos Lambert (Centre A) et de la marmite (Centre B), entre 19h45 le 6 mai (avant le démarrage des brûleurs) et 4h45 le 7 mai (après leur arrêt à 01h00).

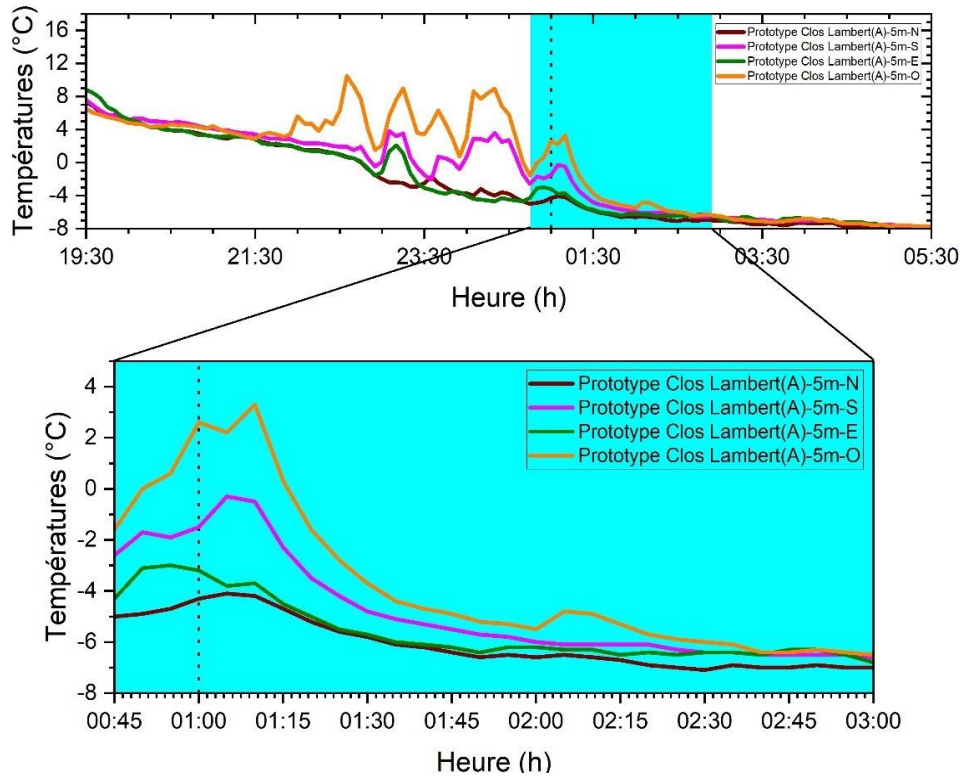


Figure 6. Variation de la température, à 5m du prototype Clos Lambert, après l'arrêt du générateur à 01h00 le 7 mai.

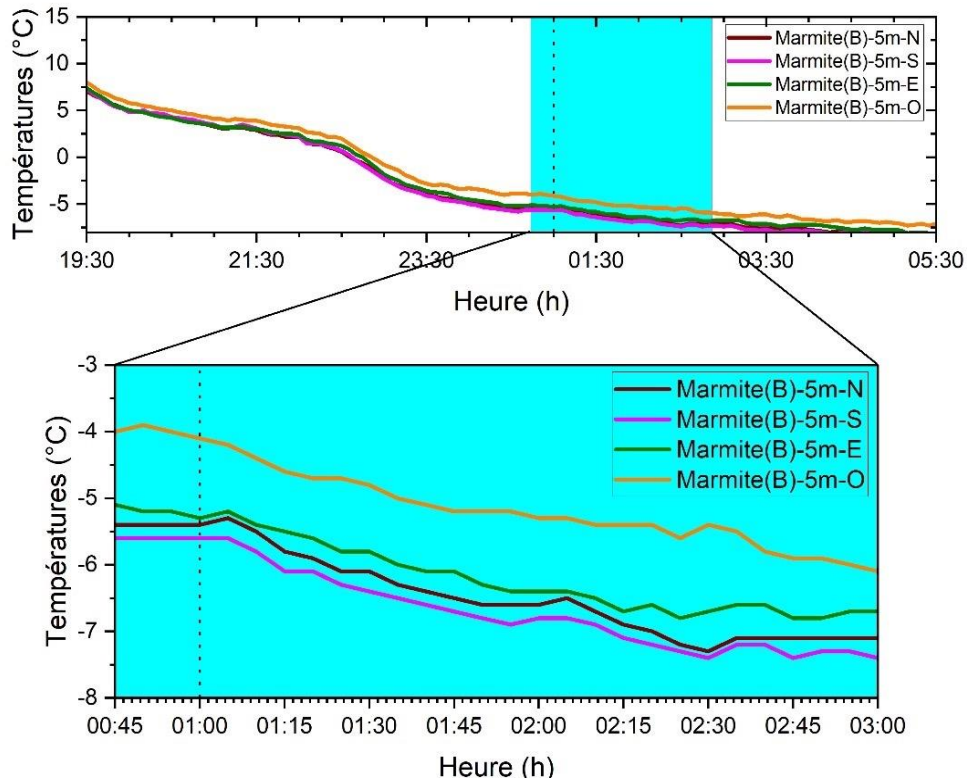


Figure 7, Variation de la température, à 5m de la marmite, après l'arrêt du générateur à 01h00 le 7 mai.

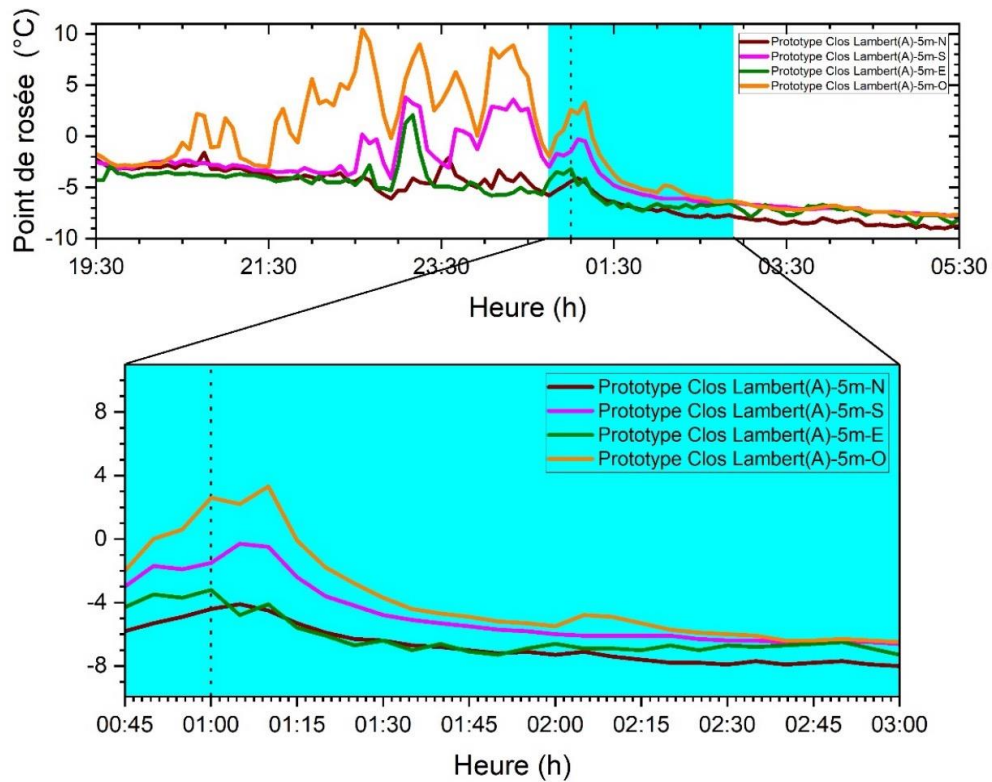


Figure 8. Variation du point de rosée, à 5m du prototype Clos Lambert, après l'arrêt du générateur à 01h00 le 7 mai.

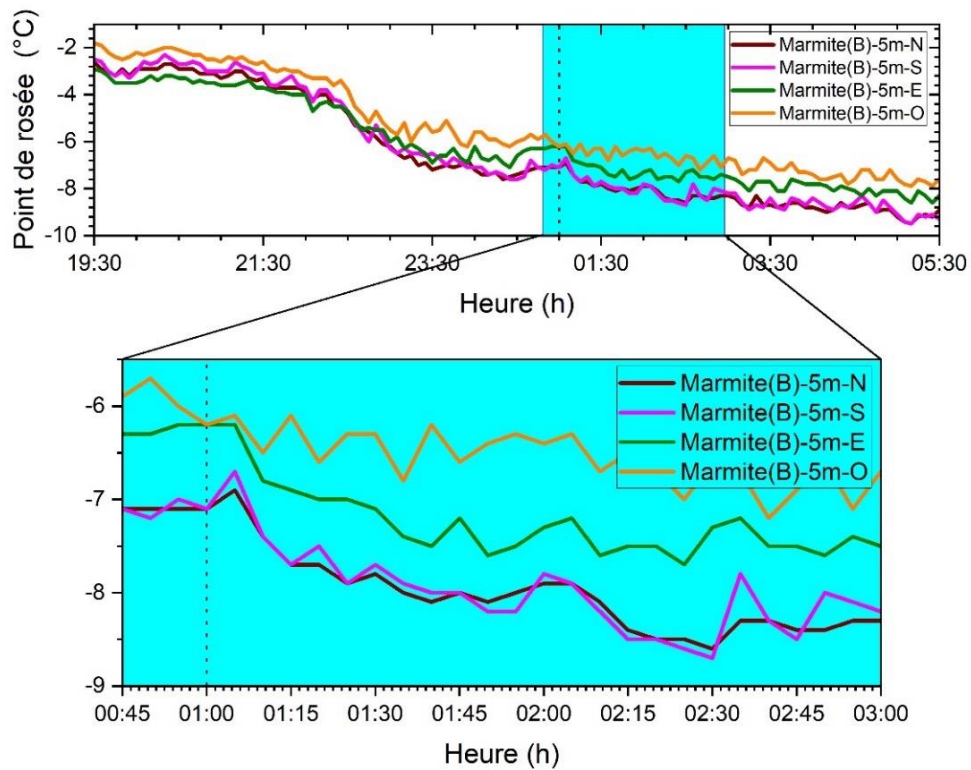


Figure 9. Variation du point de rosée, à 5m de la marmite, après l'arrêt du générateur à 01h00 le 7 mai.

3.3 Superficie couverte par chacun des générateurs d'entropie humide

Le dernier objectif spécifique était de déterminer la superficie couverte par chacun des générateurs d'entropie humide. Dans cette partie, les résultats proviennent 1) de l'analyse statistique de la variation spatiale causée par la mise en marche de ces générateurs durant la soirée/nuit du 6 au 7 mai 2022 et 2) de la visualisation vidéo de ces variations spatio-temporelles de la température de l'air et de l'entropie pour les deux équipements.

3.3.1 Analyses statistiques

Le modèle de diagramme en violon a été utilisé pour évaluer la variation de la couverture de protection offerte par les deux types de générateurs dans quatre directions (Nord, Sud, Est et Ouest). Les résultats obtenus avec le prototype du Clos Lambert sont comparés à ceux de la simple marmite et à ceux enregistrés par les sondes références situées à l'extérieur du site sous étude tant pour la température (figures 10-13) que pour l'entropie (figures 14-17).

Pour la soirée/nuit du 6-7 mai, le prototype Clos Lambert s'est avéré plus efficace que la simple marmite. Les graphiques démontrent que la température a été plus chaude près du générateur d'entropie humide résultant du prototype Clos Lambert que pour celui résultant de la simple marmite (figures 10-17). Cette tendance est relativement constante jusqu'à 20m des générateurs dans les quatre différentes directions testées, observations supportées par une médiane de 25 à 50% plus élevée à l'intérieur de ces 20m. Mais, au-delà de 20m l'influence des générateurs s'amenuise.

3.3.2 Analyses qualitatives

La visualisation des vidéos 1 à 3 supporte entièrement les résultats illustrés aux graphiques précédents. Ces visualisations suggèrent fortement que le prototype Clos Lambert est nettement plus efficace que la simple marmite et que l'influence bénéfique des générateurs d'entropie humide se limite à un rayon de 15-20m autour de ceux-ci. Ces images suggèrent aussi que la protection par la vapeur d'eau se déplace autour des générateurs, supportant ainsi la fluctuation de la température, du point de rosée et de l'entropie à l'intérieur de cette zone protégée, des résultats que les figures 10-17 laissaient entrevoir. L'hétérogénéité spatiale et temporelle de la distribution de température, du point de rosée et de l'entropie pour la nuit du 6-7 mai, est ainsi confirmée.

La nuit de l'essai une vidéo fut tournée (vidéo 4). L'intérêt de cette dernière vient du fait qu'on voit ce qui se passait sur le terrain cette nuit-là, en particulier l'effet des courants d'air qui, même sous un vent léger, impacte considérablement sur la circulation de la vapeur, validant ainsi l'interprétation faite des figures 10 à 17 quant aux fluctuations spatiales et temporelles de la protection par la vapeur d'eau.

Les figures 14 à 17 montrent une importante différence entre l'entropie provoquée par la mise en marche du prototype Clos Lambert, celle provoquée par la vapeur provenant de la simple marmite et l'entropie mesurée par la sonde référence. L'entropie humide étant un indicateur d'énergie, les résultats présentés aux figures 14 à 17 montrent clairement que l'énergie à 5m, 10m, 15m, est plus élevée pour le prototype Clos Lambert que pour la simple marmite qui elle-même en génère tout de même plus que celle mesurée au niveau de la sonde référence. Ces tendances que nous venons d'évoquer sont plus grandes pour l'entropie (figures 14-17) que pour la température (figures 10-13). L'explication simple et satisfaisante vient du fait que la pression à l'intérieur du prototype conçu au Clos Lambert assure une meilleure diffusion de la vapeur d'eau dans l'atmosphère ce qui a pour conséquence d'en ralentir son refroidissement, ce que suggère les observations sur le terrain (figures 10-13).

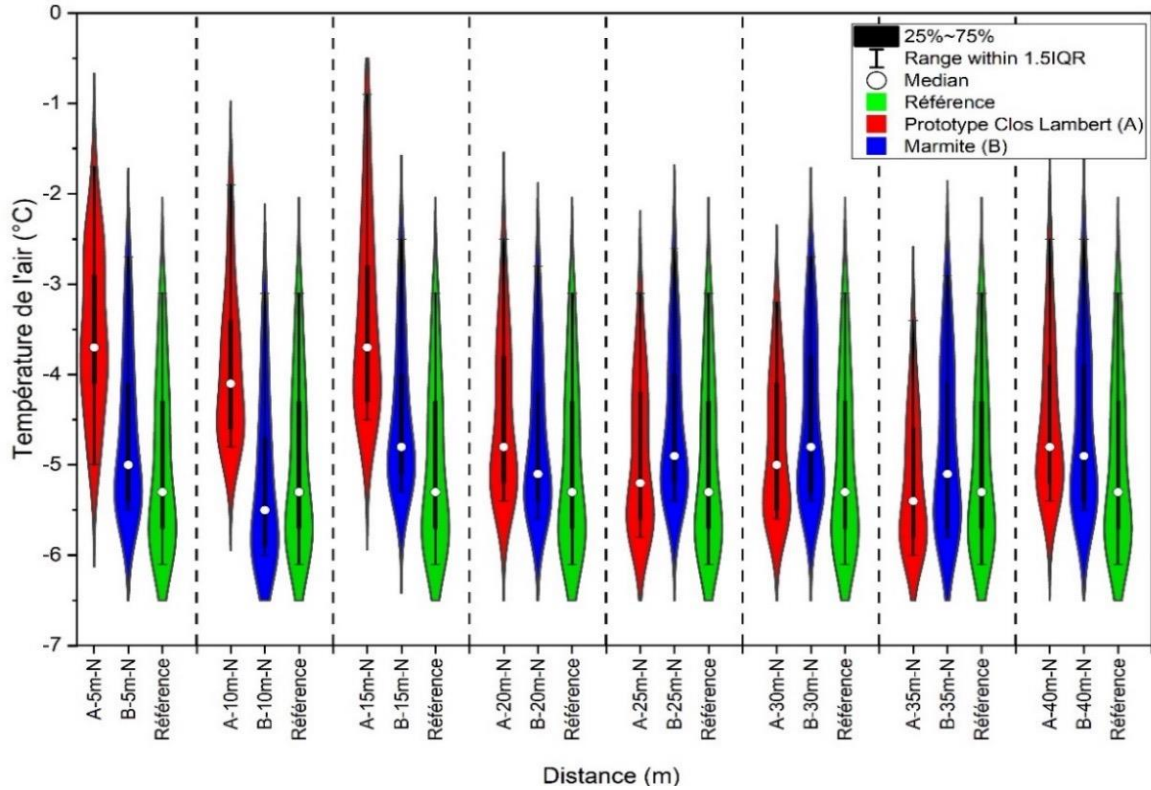


Figure 10. Diagramme en violon de la température direction Nord entre 23h le 6 mai et 1h le 7 mai 2022 (25 données/nuage en forme de violon).

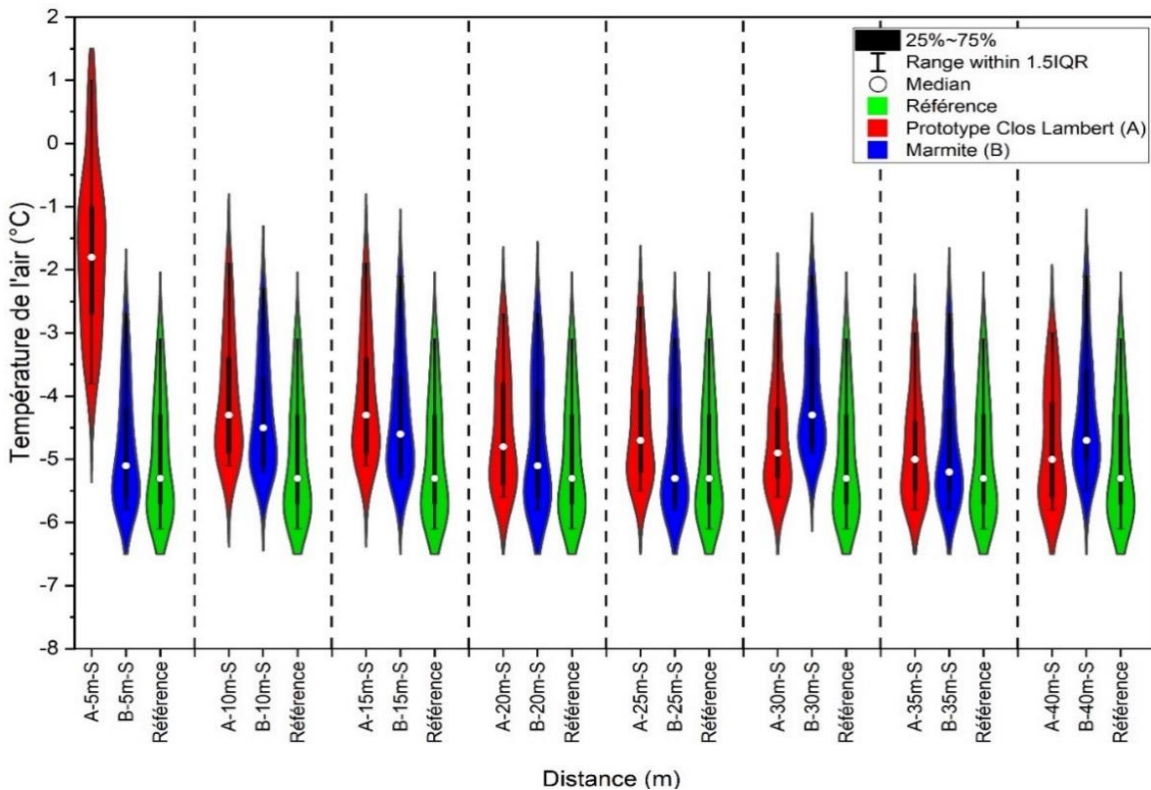


Figure 11. Diagramme en violon de la température (Degré centigrade) direction Sud entre 23h le 6 mai et 1h le 7 mai 2022 (25 données/nuage en forme de violon).

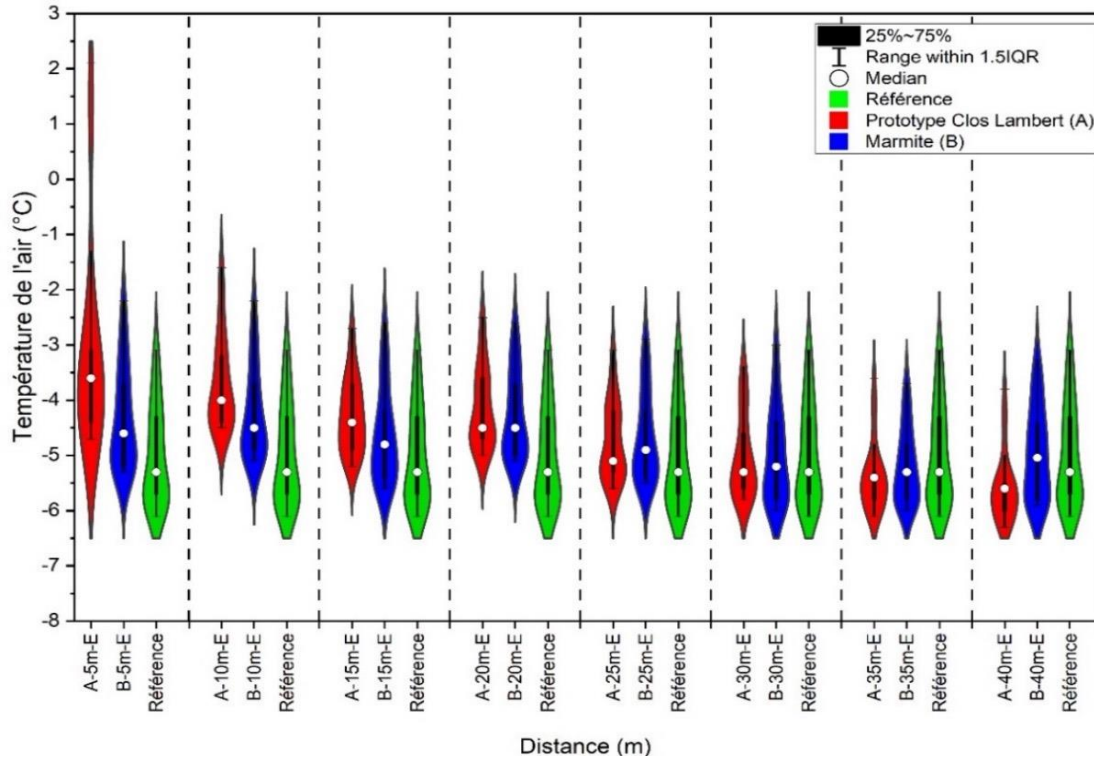


Figure 12. Diagramme en violon de la température (Degré centigrade) direction Est entre 23h le 6 mai et 1h le 7 mai 2022 (25 données/nuage en forme de violon).

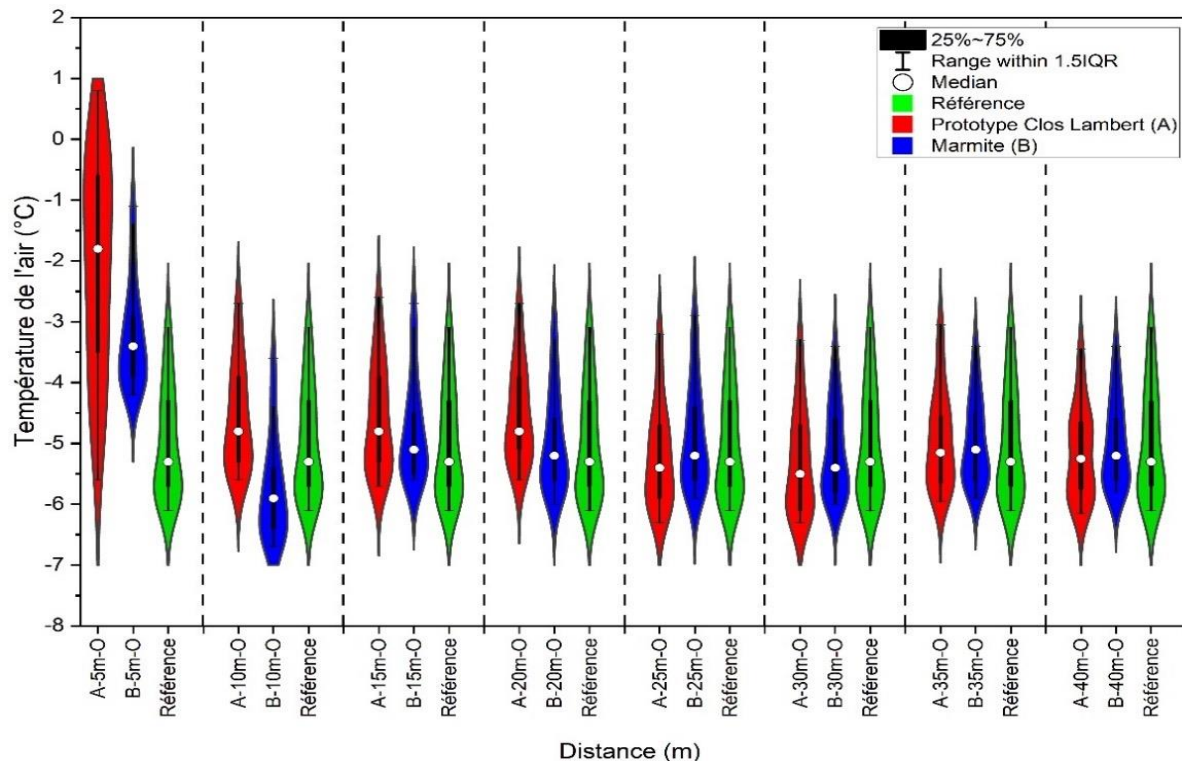


Figure 13. Diagramme en violon de la température (Degré centigrade) direction Ouest entre 23h le 6 mai et 1h le 7 mai 2022 (25 données/nuage en forme de violon).

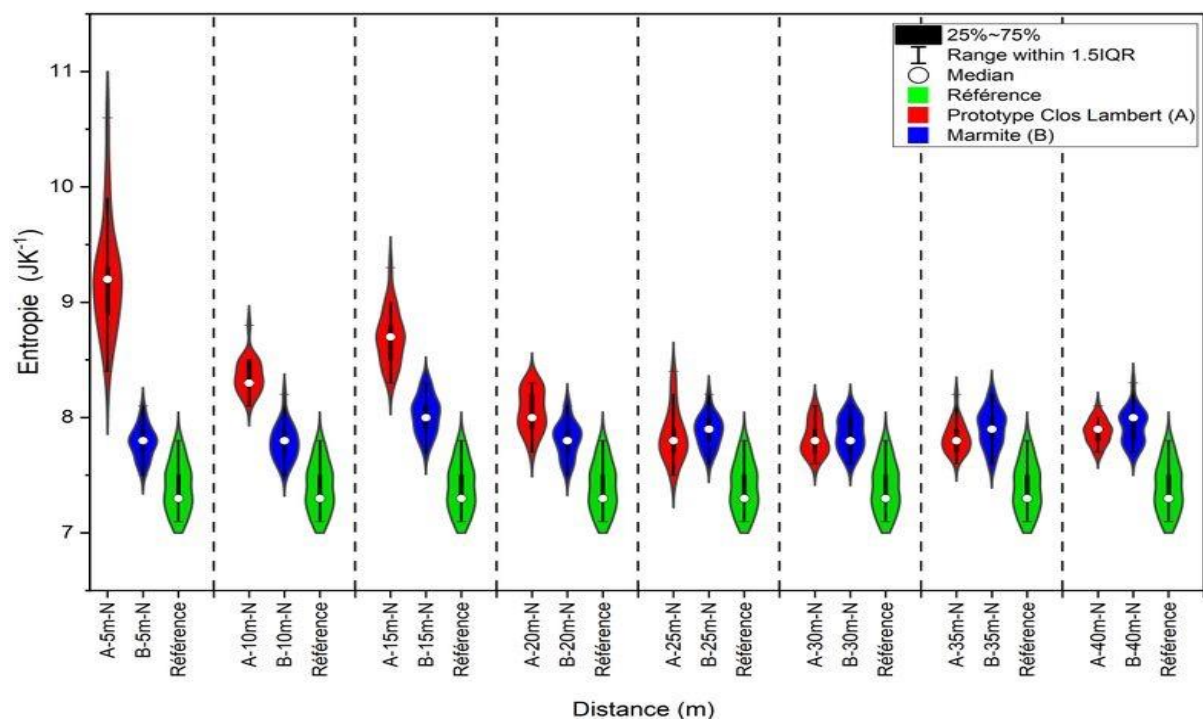


Figure 14. Diagramme en violon de l'entropie (JK⁻¹ : joules per kelvin) direction Nord entre 23h le 6 mai et 1h le 7 mai 2022 (25 données/nuage en forme de violon).

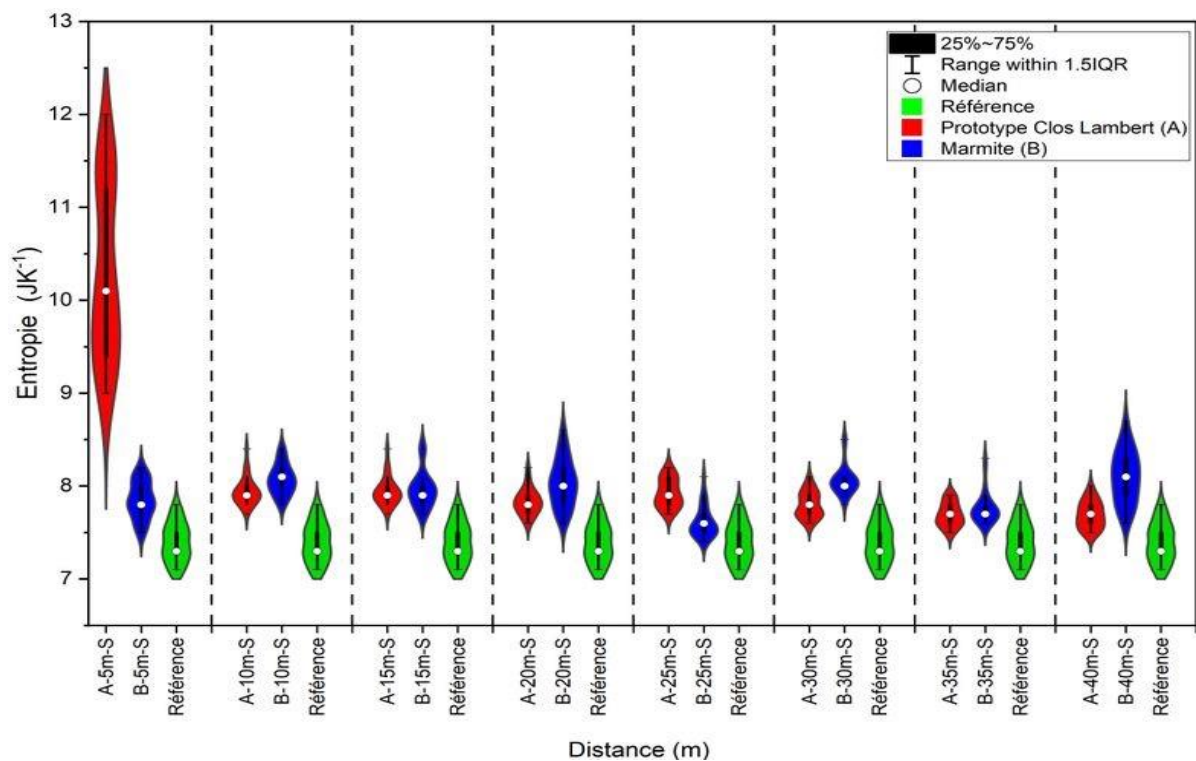


Figure 15. Diagramme en violon de l'entropie (JK⁻¹ : joules per kelvin) direction Sud entre 23h le 6 mai et 1h le 7 mai 2022 (25 données/nuage en forme de violon).

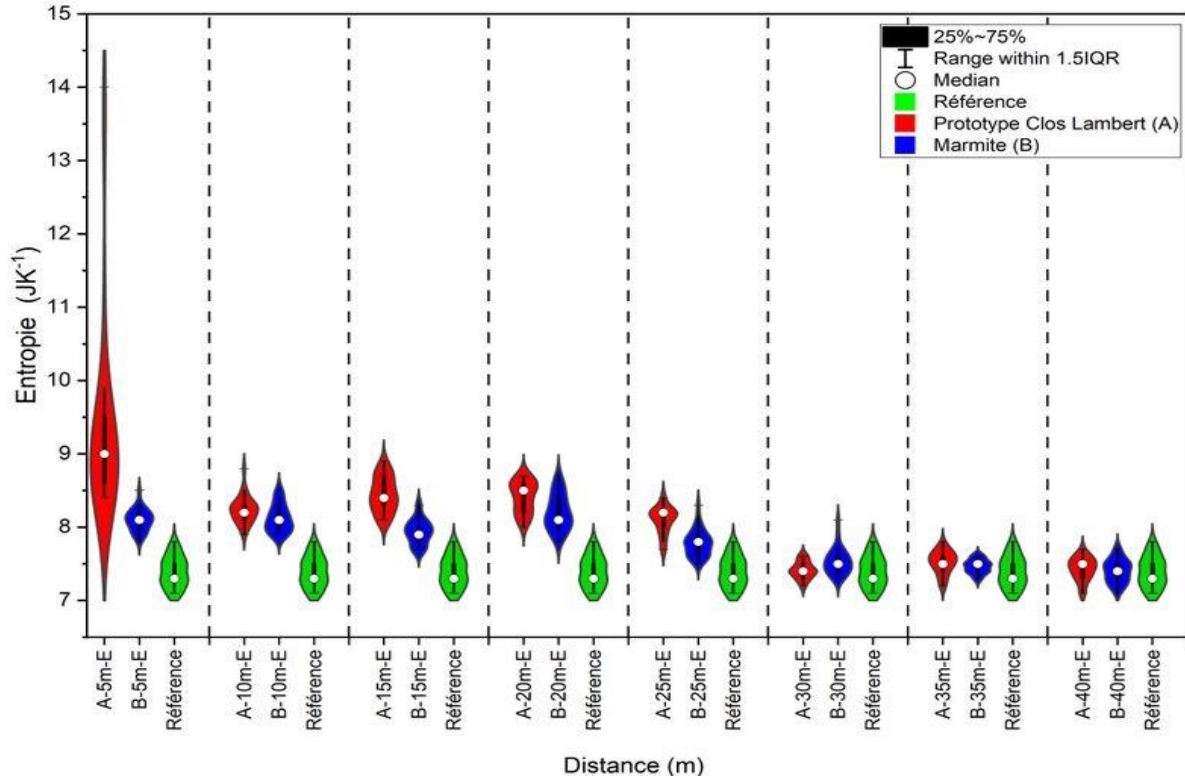


Figure 16. Diagramme en violon de l'entropie (JK⁻¹ : joules per kelvin,) direction Est entre 23h le 6 mai et 1h le 7 mai 2022 (25 données/nuage en forme de violon).

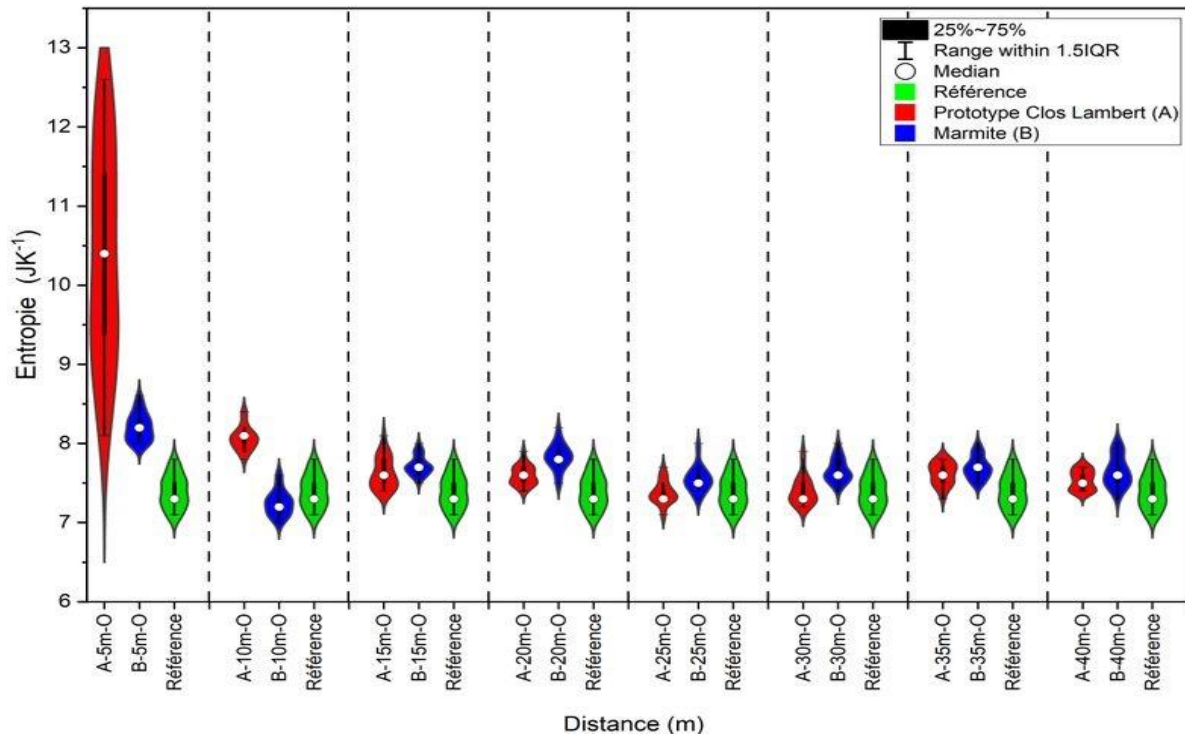


Figure 17. Diagramme en violon de l'entropie (JK⁻¹ : joules per kelvin) direction Ouest entre 23h le 6 mai et 1h le 7 mai 2022 (25 données/nuage en forme de violon).

ANNEXE

Vidéo 1. Variation spatiotemporelle de la température durant la nuit du 6-7 mai 2022 (cliquer sur l'image pour démarrer ; voir l'horloge à droite en haut de l'image pour la chronologie).



Tm.6-7new.gif

Vidéo 2. Variation spatiotemporelle du point de rosée durant la nuit du 6-7 mai 2022 (cliquer sur l'image pour démarrer ; voir l'horloge à droite en haut de l'image pour la chronologie).



Dp.6-7new.gif

Vidéo 3. Variation spatiotemporelle de l'entropie durant la nuit du 6-7 mai 2022 (cliquer sur l'image pour démarrer ; voir l'horloge à droite en haut de l'image pour la chronologie).



Entr6-7new.gif

Vidéo 4. Tournée la nuit du 6-7 mai 2022



Vidéo 4 réel.MOV

4 Discussion et conclusion

4.1 Les différents types de gels durant la soirée/nuit du 6 au 7 mai 2022

On peut distinguer deux catégories de gel : le gel par radiation (gel radiatif) et le gel par advection (gel advectif). La vitesse du vent est un indice météorologique qui permet de distinguer ces deux types de gel ; à des vitesses supérieures à 8km/h on parle de gel advectif, alors que pour un gel de type radiatif la vitesse du vent doit se situer entre 0 et moins de 8km/h par ciel clair et par haute pression atmosphérique (Perry,1998).

Nos observations sur le terrain durant la soirée/nuit du 6 au 7 mai 2022 ainsi que les données enregistrées par la station météo la plus près du vignoble soit celle dans la région de Levis (www.wunderground.com) nous révèlent que la vitesse du vent était de 11.20 km/h entre 18h00 et 23h00 le 6 mai, alors qu'entre 23h00 et 1h00, la vitesse variait entre zéro et 4.8 km/h; ces dernières conditions sont parfaites pour l'observation d'un gel radiatif (Lampartova *et al.*, 2015). Donc, durant la soirée du 6 mai, il y a eu une combinaison de gels advectif et radiatif. Lorsque cela survient, la masse d'air froid transportée par advection favorise la création ainsi que l'augmentation de l'intensité d'un gel radiatif lors d'une nuit par ciel clair parce qu'il y a une double perte d'énergie, par advection et par radiation (Cellier,1993 ; Blanc *et al.*, 2022). C'est ce qui s'est produit la soirée/nuit du 6 au 7 mai 2022.

Parmi les différentes variables atmosphériques (par exemple, la température, la pression d'air, et l'humidité relative), la direction de vent est celle qui influence le plus la diffusion de la vapeur d'eau. Le vent, agissant comme transporteur de vapeur, impose la direction à la distribution de la vapeur. En revanche, durant un épisode de gel radiatif, la vitesse du vent étant faible on doit changer de stratégie pour diffuser la vapeur. C'est la raison qui nous a incité à développer le générateur conçu au Clos Lambert. Le recours à 4 bras permet non seulement de transporter la vapeur d'eau dans 4 directions, mais aussi de couvrir une superficie plus vaste. Donc, durant un épisode de gel radiatif, la localisation de la machine ainsi que les directions des bras doivent être choisis avec précaution.

La méthode d'atténuation du froid la plus couramment utilisée (Song *et al.*, 2021 ; Piekels *et al.*, 2004) utilise la température de l'air pour évaluer son effet, un paramètre qui est bien sûr d'une importance critique ; cependant, lorsque nous voulons quantifier la chaleur dans l'air, la température seule n'est pas suffisante. On doit ajouter des mesures supplémentaires (Piekels *et al.*, 2004 ; Ikani *et al.*, 2015, Ikani, 2019). La méthode proposée par le Clos Lambert (CL), met plutôt à profit

le principe physique de l'entropie humide, basé sur le taux d'humidité, la température et la masse thermique.

En effet, au lieu d'augmenter la température de l'air, la production de vapeur d'eau entraîne une augmentation de l'énergie thermique. Chaque source d'entropie (par exemple le générateur de vapeur conçu au Clos Lambert) génère une augmentation de la température ainsi que de l'humidité dans l'atmosphère. Dans le cadre de cet essai nous avons démontré que l'augmentation de l'entropie humide réduit la chute de température nocturne et, par conséquent, protège du gel.

Le taux de perte de chaleur par radiation est partiellement déterminé par la quantité d'humidité présente dans l'atmosphère (Abraham and Janosi, 2004).

Le point de rosée mesure la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. Le point de rosée c'est la température au-dessous de laquelle l'eau change d'état ; la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense alors sur les surfaces par effet de saturation ; c'est la rosée qui se dépose alors naturellement sur le sol ; de l'état gazeux elle devient liquide et, pendant ce processus, elle perd de la chaleur.

La pression atmosphérique et l'humidité ambiante ont une incidence sur ce phénomène. Plus le point de rosée est élevé, moins on perd de la chaleur par radiation (Fig.18). Ce phénomène s'explique par le fait que le rayonnement thermique est absorbé par la vapeur d'eau et puis redirigée vers le sol (Wallace and Hobbs, 2006) ; un point de rosée plus bas signifie qu'il y a moins de vapeur d'eau dans l'air pour absorber et re-émettre l'énergie (la chaleur) vers la surface.

La figure 18 illustre ce qui précède en montrant que plus il y a de l'humidité dans l'air moins on perd de la chaleur par radiation.

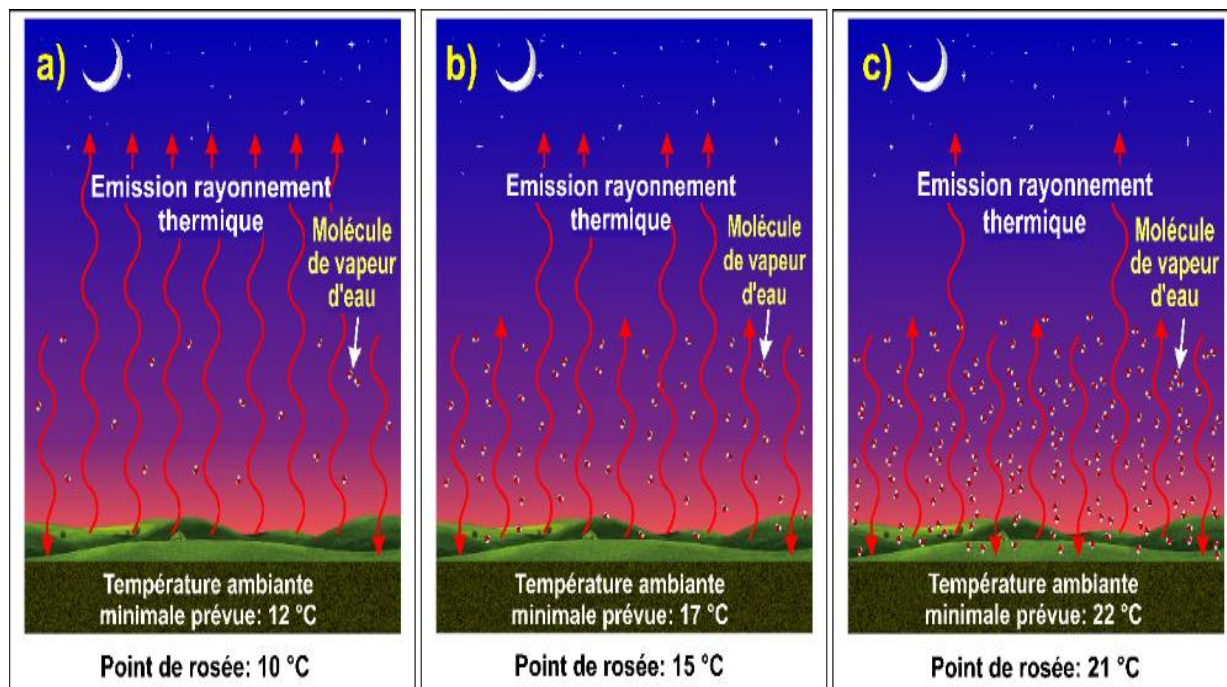


Figure 18. Influence du point de rosée et de la température minimale sur les émissions de rayonnement thermique. Les points sur chaque diagramme représentent la quantité de vapeur d'eau dans l'air. Le rayonnement thermique est absorbé par la vapeur d'eau et est ensuite émis (retourné) vers le sol. Les flèches rouges ondulées représentent les rayons infrarouges. Plus le point de rosée est élevé, plus les molécules de vapeur d'eau contenues dans l'air renvoient la chaleur vers le sol. (Préparée par Vahid Ikani, Adapté de Ahrens and Henson, 2018).

4.2 L'effet d'une simple bouilloire (ici la marmite)

Rappelons que les résultats obtenus en Estrie dans un verger suggéraient que la vapeur d'eau pouvait contrer les gels radiatifs (Ikani, 2019 ; Ikani *et al*, 2015) ; de plus, l'essai mené à La Halte des Pèlerins dans la région immédiate de Sherbrooke mettait en œuvre de multiples moyens pour tenter de contrer les gels, dont la vapeur d'eau (Ikani, 2021). Ce dernier essai expérimental n'avait pas été conçu pour discriminer entre l'effet spécifique de cette vapeur et tous les autres moyens utilisés là-bas pour contrer les gels radiatifs. Les résultats obtenus ici ne nous permettent pas de confirmer ou d'infirmer l'effet protecteur de la vapeur d'eau générée par une simple bouilloire. Bien sûr à 50cm de la bouilloire on note une augmentation spectaculaire de la température (figure 4) et du point de rosée (figure 5) ; mais, comme à 5m cet effet devient négligeable (figures 7 et 9), on peut suggérer que le premier effet est causé par la chaleur dégagée par le brûleur plutôt que celle produite par la vapeur d'eau. Cependant, comme on observe en direction Ouest un effet de la marmite aussi bien sur la température (figure 7) que sur le point de rosée (figure 9), notamment entre 0h45

et 3h durant la nuit du 7 mai, on peut donc supposer qu'une simple marmite peut avoir un effet bénéfique, sans doute limité, sur le contrôle des gels radiatifs.

4.3 L'effet du prototype conçu au Clos Lambert

La question la plus importante posée dans l'essai actuel est la suivante : Un générateur d'entropie humide (d'humidité) peut-il contrer les gels radiatifs ? Les résultats obtenus dans le cadre de nos travaux le suggèrent. Tout comme pour la simple marmite, à 50cm du générateur conçu au Clos Lambert (prototype Clos Lambert) on note une augmentation spectaculaire de la température (figure 4) et du point de rosée (figure 5), mais contrairement à la simple marmite cette tendance se maintient à 5m du générateur (figures 6 et 8). On note une prédominance d'effet du côté Ouest ; en direction Sud on voit un effet intermédiaire sur la conservation de la chaleur sous l'effet de la vapeur d'eau générée par le prototype Clos Lambert.

Dans les autres directions l'effet est plus mince. Pour se convaincre de l'importance que pourrait jouer un générateur efficace d'entropie humide dans la protection contre un gel radiatif, on n'a qu'à regarder la chute de température et du point de rosée après la fermeture des générateurs.

En seulement 30 minutes, à 5m du prototype Clos Lambert on perd 6 degrés Celsius du côté Ouest, 4 du côté Sud et environ 2 des côtés Est et Nord, tant pour la température (figures 6) que pour le point de rosée (figure 8), alors qu'à 5m de la simple bouilloire la diminution est de moins de 1 degré C toute direction confondue autant pour la température (figure 7) que pour le point de rosée (figure 9).

Comment expliquer ces écarts de température, de point de rosée et d'entropie entre le prototype conçu au Clos Lambert et la simple bouilloire ? Nous proposons celle-ci : Le fonctionnement du prototype conçu au Clos Lambert se fonde sur un principe physico-chimique simple : Plus la pression générée par la chaleur est élevée dans un réservoir, plus élevée est la température de la vapeur d'eau.

En corollaire, plus la pression est élevée à l'intérieur du générateur, plus élevée est la pression à la sortie de ces bras et plus efficace est donc la diffusion de la vapeur. En conséquence, il en résulte, une amplification de l'entropie humide.

Concernant l'observation à la figure 4 montrant que la simple marmite (courbe bleu) génère une température supérieure à celle générée par le prototype Clos Lambert (courbe rouge), nous n'avons

pas suffisamment de données pour l'expliquer ; mais, comme cela n'a pas d'incidence sur les objectifs de nos travaux, nous nous limiterons à l'observer.

Nos résultats démontrent que la vapeur d'eau produite par un générateur tel que celui développé au Clos Lambert peut influencer les conditions micro-météorologiques (la température, l'humidité et l'énergie) sur un rayon entre 15 et 20 mètres. Les résultats démontrent aussi que tant le prototype Clos Lambert que la simple bouilloire a un effet plus grand sur l'entropie (ou l'énergie) que sur la température. Par conséquent, tel que nous l'avions prédit, l'augmentation de la vapeur d'eau dans l'air influence l'énergie de système et par ricochet, influence la température, même sous des conditions de gel sévère telles que celles qui ont prévalu durant la nuit du 6 au 7 mai 2022. En conclusion, les résultats démontrent que la vapeur d'eau peut agir comme un régulateur de température.

4.4 Au-delà de 5m que se passe-t-il ?

Les résultats sont ici plus difficiles à interpréter parce que autant les mesures de température que les données sur l'entropie varient considérablement en fonction de l'orientation des sondes. Ainsi, pour la température (figures 10-13) on constate un effet jusqu'à 15m en direction Est et jusqu'à 25m en direction Sud, alors que pour l'entropie (figures 14-17) on constate un effet similaire jusqu'à 5m en direction Sud et jusqu'à 25m en direction Est.

Ces tendances sont cependant faibles puisqu'en général seulement 0,5-1°C sépare le prototype Clos Lambert de la simple bouilloire ; ces différences sont à peine plus grandes lorsqu'on compare le prototype à la valeur référence. Les vidéos 1-3 confirment de façon éloquente ce constat. Mais, considérant les conditions de gel sévères qui ont prévalu la nuit du 6 au 7 mai et, surtout le fait qu'un seul générateur de type Clos Lambert a été utilisé, nous sommes tout de même agréablement surpris de voir une différence. Car, selon nous, un réseau de générateurs aurait un effet synergique et par conséquent une efficacité protectrice nettement accrue.

Une constante semble ainsi se dégager des figures 10 à 17 : au-delà de 5m de distance du générateur Clos Lambert, l'effet bénéfique de la vapeur d'eau s'estompe considérablement pour devenir négligeable au-delà de 20m. Les données de température et d'entropie présentées aux figures 10 à 17 illustrent aussi le plus haut degré de performance du générateur conçu au Clos Lambert par rapport à l'effet induit par la simple bouilloire, confirmant ainsi l'interprétation faite à la section 4,3.

4.5 La direction des courants d'air et leur influence

Les figures 6 et 8 sont caractérisées par une fluctuation considérable de la température et du point de rosée respectivement en fonction du temps et aussi en fonction de l'orientation des capteurs. Les courbes en dents de scie pour le point de rosée en directions Ouest et Sud (figure 8) sont particulièrement éloquentes. On a déjà mentionné à la section 4.3 à quel point ces fluctuations sont claires après la fermeture des générateurs, la chute de température et de point de rosée étant très variables d'une orientation des sondes à l'autre. L'ensemble de ces phénomènes s'explique probablement par la direction variable des courants d'air qu'on a mis en évidence dans la vidéo 4 et qui, la nuit du 6 au 7 mai, pouvaient effectivement voltiger dans toutes les directions. Ces vents, même légers et de directions variables à une vitesse inférieure à 4-5km/h, semblent avoir causé ces fluctuations.

4.6 Quoi faire maintenant ?

Mettant à profit les résultats obtenus dans les travaux présentés ici, nous sommes maintenant en mesure de proposer une nouvelle approche pour protéger l'ensemble du vignoble d'un éventuel gel radiatif. Un premier constat s'impose : considérant la direction variable des courants d'air, quatre sorties d'un générateur de vapeur ne suffisent peut-être pas à couvrir adéquatement la superficie correspondant au rayon des bras d'évacuation de la vapeur (Figure 19).

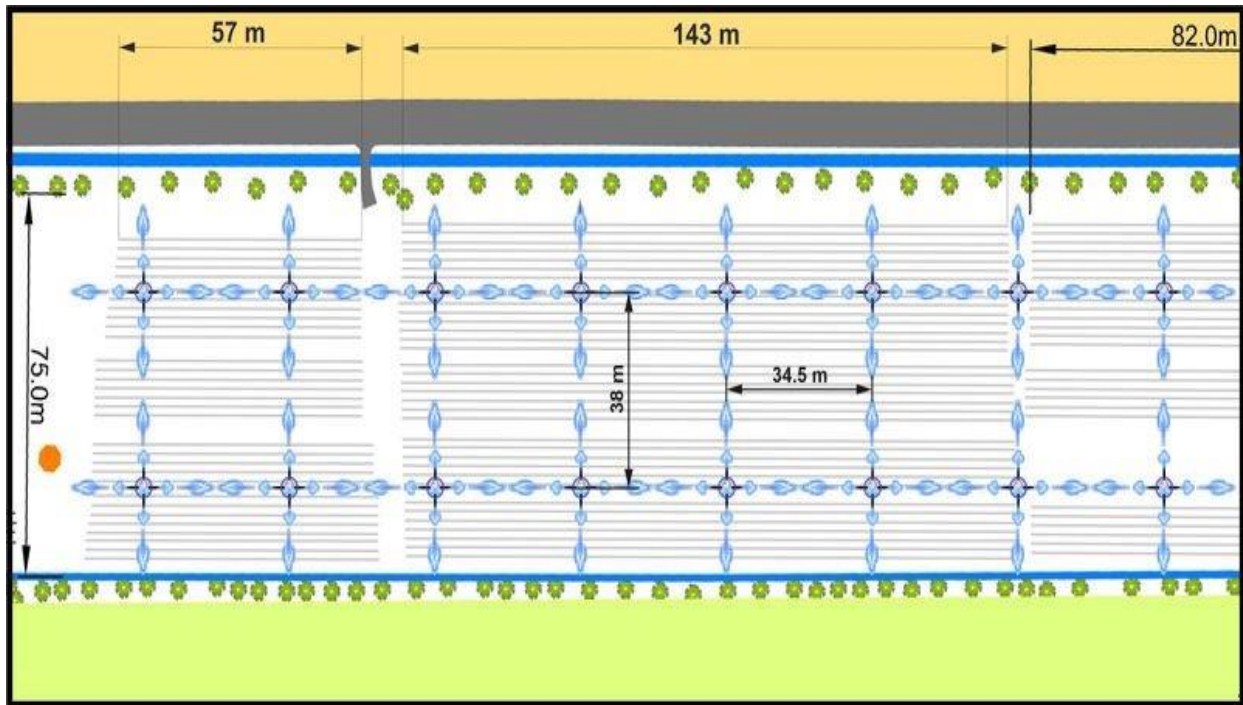


Figure 19. Schéma d'aménagement des générateurs de vapeur de type Clos Lambert avec 4 sorties

Il serait peut-être préférable d'ajouter un module en forme de Y à l'extrémité de chacun des 4 bras tel qu'illustré à la figure 20 (a, b, c, d). En théorie, la position 60° (figure 20 c) pourrait couvrir le maximum de superficie, nous permettant de produire une cellule de chaleur humide en forme de losange (figure 21).

Tel que mentionné à la section 2.1 (Méthodologie), la vitesse d'évaporation de l'eau était de 8L/h durant la première heure de fonctionnement des brûleurs pour ensuite chuter à ± 4 L/h. Cette chute a été causée par une diminution de puissance des brûleurs au gaz propane elle-même causée, sous l'influence de l'évaporation du gaz propane, par le refroidissement de la bonbonne. Afin de maintenir la puissance nous suggérons d'utiliser 2 bonbonnes/brûleur qui seraient remplacées en alternance aux heures.

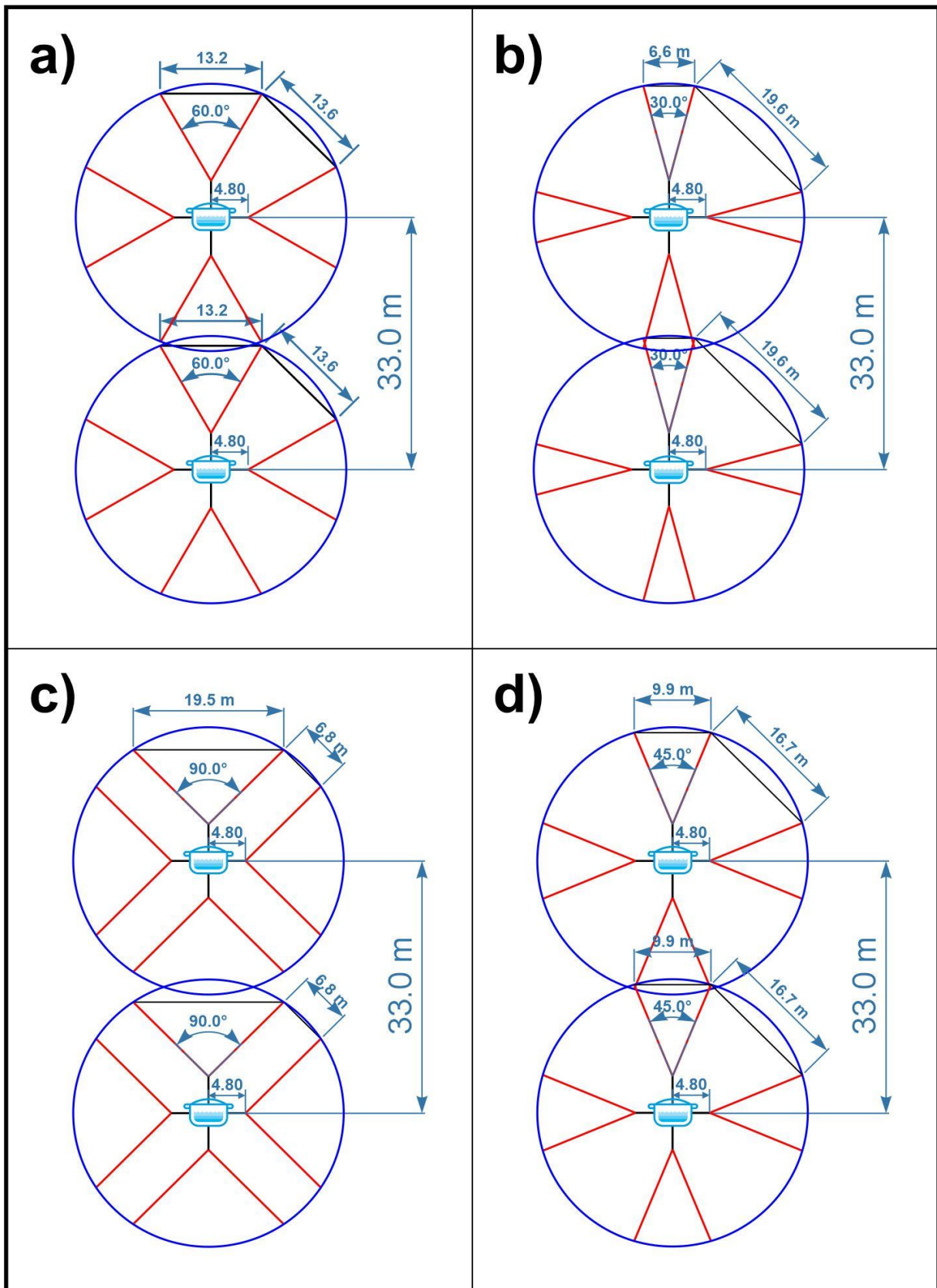


Figure 20. Représentation de divers modèles de diffusion de la vapeur d'eau.

4.6.1 Le nombre de générateurs requis pour une protection adéquate du vignoble

Puisque le rayon d'action d'un générateur de vapeur tel celui conçu au Clos Lambert se situe entre 15 et 20m, 2 générateurs sur la largeur du vignoble devraient suffire pour une protection adéquate alors que sur la longueur il en faudrait 8, pour un total de 16 (figure 21).

On peut aussi effectuer un calcul théorique basé sur deux constantes, celle de l'énergie requise pour augmenter la température de 1m cube d'air et celle requise pour faire passer l'eau de son état liquide à son état gazeux, en utilisant la formule suivante : $N_g = V \times E_a / E_w / v_e$

dans laquelle:

- V représente le volume d'air à protéger en m cubes (variable d'un emplacement à l'autre)
- E_a représente l'énergie (Joules) requise pour augmenter la température de 1m cube d'air de 1°C (constante = 1,297kJ/m cube/°C)
- E_w représente la quantité d'énergie (Joules) requise pour faire passer la température d'un litre d'eau de 20°C à 100°C (334kJ), puis en vapeur d'eau (2256kJ) = 2590kJ/L H₂O (constante)
- v_e représente la vitesse d'évaporation de l'eau en L/h (variable d'un système à l'autre)

E_a est une constante qui se calcule avec la formule suivante :

$$E_a = M/m \times C_t$$

dans laquelle M représente la masse de 1m cube d'air (+/-1293g), m représente la masse molaire de l'air (20% O₂, 80% N₂) soit 29g/mol et C_t représente la capacité thermique massique de l'air (29,1Joules/mol/°C). Ainsi, $M/m \times C_t = (1293g/m \text{ cube}) / (29g/mol) \times (29,1Joules/mol/°C) = 44,59mol/m \text{ cube} \times 29,1Joules/mol/°C = 1297J/m \text{ cube}/°C$.

$$E_a = 1297J/m \text{ cube}/°C = 1,297kJ/m \text{ cube}/°C$$

E_w est également une constante qui se calcule de la façon suivante :

$$E_w = E_b + E_v$$

E_b représente la quantité d'énergie requise pour faire passer la température d'un litre d'eau de 20°C à 100°C = 334kJ

E_v représente la quantité d'énergie requise pour transformer l'eau liquide en vapeur d'eau = 2256kJ

$$E_w = E_b + E_v = 334kJ + 2256kJ = 2590kJ/L H_2O$$

Connaissant ces constantes, la formule $N_g = V \times E_a / E_w / v_e$ devient $N_g = V \times (1,297kJ/m \text{ cube}/°C) / (2590kJ/L H_2O) / v_e$

Le nombre de générateurs de vapeur nécessaires pour produire une énergie suffisante pouvant assurer la protection du vignoble du froid/°C devient alors facile à calculer puisqu'il ne faut ajouter à l'équation que le volume d'air à protéger et la vitesse d'évaporation du générateur de vapeur.

Appliquons cette formule au vignoble Clos Lambert : Dans la vidéo 4 tournée la nuit du 6-7 on a vu que la vapeur pouvait atteindre environ 3m d'altitude, mais que pour l'essentiel la vapeur longeait plutôt le sol pour se situer en général bien en dessous de 2m. Ainsi le volume d'air dans le vignoble à protéger se calcule par la hauteur (2m) X la largeur (75m) X la longueur (300m), soit 45 000m cube.

On a aussi vu que la vitesse maximale d'évaporation de l'eau dans le prototype Clos Lambert était de 8L/h

Donc, dans l'exemple du Clos Lambert, $V = 45\ 000\text{m cubes}$ et $v_e = 8\text{L/h}$; la formule $N_g = V \times (1,297\text{kJ/m cube}/^\circ\text{C}) / (2590\text{kJ/L H}_2\text{O}) / v_e$ devient $N_g = 45\ 000\text{m cubes} \times (1,297\text{kJ/m cube}/^\circ\text{C}) / (2590\text{kJ/L H}_2\text{O}) / (8\text{L/h}) = 3$.

Ainsi, 3 générateurs pouvant évaporer 8L d'eau à l'heure seraient requis pour protéger le vignoble d'une chute de température de 1°C.

Par conséquent, l'opération simultanée de 15 générateurs de type Clos Lambert qui évaporerait 8L d'eau/h seraient requis pour protéger le vignoble d'une chute de température de 5°C.

Cette formule simple pourrait être appliquée sur n'importe quel site de production agricole, évitant ainsi les analyses complexes auxquelles on a eu recours dans cet essai, À CONDITION toutefois que la formule soit validée sur plusieurs autres sites.

Finalement, les résultats présentés dans ce rapport démontrent l'importance d'établir une résolution spatiotemporelle fine pour analyser et optimiser l'efficacité de méthodes de protection contre le gel dans le domaine agricole.

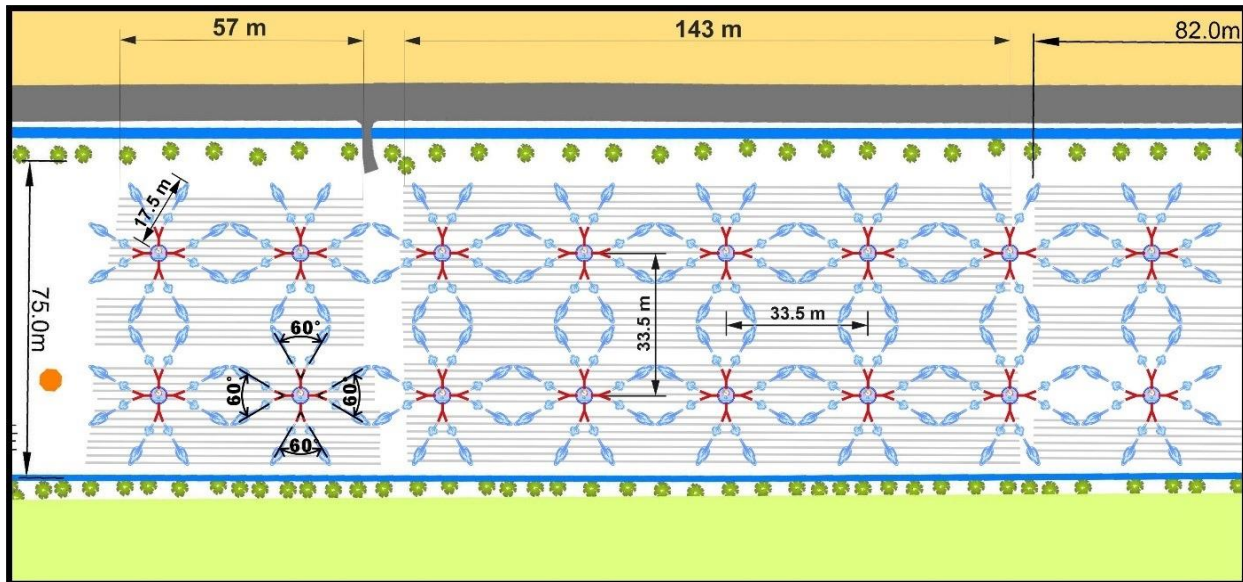


Figure 21. Schéma d'aménagement des générateurs de vapeur de type Clos Lambert (modèle suggéré).

4.6.2 En conclusion :

- 1) La vapeur d'eau générée sous pression réduit la déperdition de chaleur, même en situation de gel sévère, validant ainsi le concept que nous avons proposé ;
- 2) Pour protéger un peu plus de 2ha de terrain, il faudrait en théorie 16 générateurs du type de celui conçu au vignoble Clos Lambert ;
- 3) Par prudence, il serait préférable de démarrer les générateurs 2h avant le début d'un gel annoncé ;
- 4) Finalement, la protection assurée par un générateur de vapeur Clos Lambert s'éteint au plus 30 minutes après l'arrêt du générateur.

Remerciement

Nous tenons à remercier Jenny Leblanc agronome à la direction régionale de la Capitale-Nationale et de Chaudière-Appalaches du MAPAQ pour son implication lors de l'installation des sondes le 6 mai 2022 et pour une lecture attentive de ce rapport et ses commentaires pertinents. Nous tenons aussi à remercier le MAPAQ qui, par le biais du programme Appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région, a subventionné nos travaux et le support financier du vignoble Clos Lambert. Sans ces deux appuis les travaux présentés ici n'auraient pas été possible.

Références :

- Ábrahám, M. Pattantyús I. Jánosi. M (2004) What determines the nocturnal cooling timescale at 2 m? *Geophysical research letters*, Vol. 31, L05109, p.1- 4
- Ahrens.C., Henson.R (2018) *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate and the Environment*, Brooks/Cole, Cengage Learning, p.656
- Cellier, P (1993) An operational model for predicting minimum temperatures near the soil surface under clear sky conditions. *J. Appl. Meteor*, 32, pp. 871–883
- Chong Ho Alex Yu (2022) *Data Mining and Exploration From Traditional Statistics to Modern Data Science*, CRC Press., p.290
- Ikani, V (2021) Gel tardif à la Halte des Pèlerins : Des chercheurs sauvent la cuvée, *journal la Tribune*, 4 juin , 2021
- 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
- Lampartova, I., Schneider, J., Vyskot, I., Rajnoch, M. and Litschmann, T (2015) Impact of protective shelterbelt microclimate characteristics. *Ekológia (Bratislava)*. 34, pp. 101–110.
- 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.
- Perry. K (1998) *Basics of Frost and Freeze Protection for Horticultural Crops*, Hort Technology, Vol. 8, NO. 10
- Pielk, R.A., SR., C. Davey, Morgan. J (2004) Assessing global warming with surface heat content, *EOS*,85, No.21, 210-211
- Paulo de Melo. J. Snyder.A., Richard. L (2006) *Frost Protection: fundamentals, practice, and economics*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 64 pages
- Song. F., Guang J. Ramanathan. V (2022) Trends in surface equivalent potential temperature: A more comprehensive metric for global warming and weather extremes, *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, V.119, No, 6, p.1-7
- Wallace. J.M., Hobbs. P (2006) *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, Academic Press; 2 editions. p. 504