

**PROGRAMME D'APPUI AU DÉVELOPPEMENT DE L'AGRICULTURE ET DE
L'AGROALIMENTAIRE EN RÉGION**

**CARACTÉRISATION DE LA GESTION DU CLIMAT POUR LES CULTURES DE CLIMAT FROID SOUS ABRI
CHEZ LES PRODUCTEURS DE L'ESTRIE**

Projet No. 8857204

Décembre 2023 à mai 2024

RAPPORT FINAL

Réalisé par :
Jacques Thériault, Climax conseils

Révision :
Geneviève Legault, MAPAQ
Philippe-Antoine Taillon, MAPAQ
Danielle Monfet, École de technologie supérieure (ÉTS)
Charlotte Giard Laliberté, Institut national d'agriculture biologique (INAB)

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.

TITRE DU PROJET : CARACTÉRISATION DE LA GESTION DU CLIMAT POUR LES CULTURES DE CLIMAT FROID SOUS ABRI CHEZ LES PRODUCTEURS DE L'ESTRIE

RÉSUMÉ DU PROJET – faits saillants (Maximum 10 lignes)

La culture de légumes de climat frais en serre minimalement chauffée est une nouvelle pratique agricole qui se développe au Québec. La stratégie de croissance des serres 2020-2025 a stimulé les investissements en serre et encouragé à augmenter l'offre de produits de serre sur une plus longue période dans l'année. En Estrie, une quinzaine d'entreprises ont débuté la culture de légumes de climat frais pendant les mois d'automne et d'hiver (octobre à avril). Les cultures visées sont adaptées aux basses températures (épinard, mesclun de laitue salanova et de crucifères, roquette, autres verdurettes asiatiques). Les serres utilisées sont de basse à moyenne technologie et les cultures sont en plein sol, la plupart du temps en régie biologique.

Ce projet a permis d'observer l'impact de la ventilation et du chauffage sur la température et l'humidité dans les serres maintenues à basse température pendant des journées ensoleillées ou nuageuses, froides ou tempérées et des nuits types à ciel clair ou nuageux. Les données recueillies démontrent que l'orientation des serres, le dimensionnement des équipements de ventilation et chauffage, ainsi que les consignes de ventilation et de chauffage utilisées n'ont pas permis de maintenir les consignes sur les deux sites étudiés.

L'auteur propose dans ce rapport une charte de besoins de chauffage et ventilation pour les serres minimalement chauffées et une charte d'humidité absolue et déficit d'humidité entre 10° et -20°C.

OBJECTIFS

Accélérer l'acquisition de nouvelles connaissances pour bâtir une expertise intégrant les principes agronomiques et thermodynamiques pour la gestion des cultures froides sous abri

- Améliorer la compréhension des phénomènes thermiques dans une serre minimalement chauffée ou non chauffée
- Améliorer la compréhension de l'impact des pratiques de gestion du climat sur l'atteinte des objectifs climatiques

MÉTHODOLOGIE

1) Choix des sites à l'étude

Le projet initial devait impliquer 4 entreprises disposant d'équipements d'acquisitions de données pour supporter les analyses des stratégies de production. Malheureusement, deux entreprises ont dû se désister par suite de problématiques d'acquisition de données.

La première entreprise participante est l'INAB de Victoriaville (annexe 1 diapo 5). Le site comporte deux serres individuelles orientées Nord-Est Sud-Est, avec une serre chauffée (serre au nord-ouest, N-O) et une non-chauffée (serre au sud-est, S-E). La serre N-O

avait une consigne de chauffage de 0°C et de ventilation à 15°C. La déshumidification était basée sur le temps, soit 10 minutes aux 2 heures durant la nuit et 10 minutes après le lever du soleil en activant le ventilateur à pression positive et le chauffage. La serre S-E n'avait aucune consigne de chauffage ou de déshumidification et ventilait à une température de 15°C par un ventilateur à pression positive. Le système d'acquisition des données disposait d'une station météo avec pyranomètre et la serre avait été instrumentée pour mesurer les effets de l'utilisation des bâches flottantes sur la température du sol, de la température et de l'humidité de l'air sous et au-dessus des couvertures flottantes. Les données climatiques ont été récoltées du 1^{er} octobre au 5 décembre 2024

La deuxième entreprise participante est La Boîte à légumes de Sherbrooke (annexe 1 diapo 6). Le site comporte deux serres individuelles de dimensions différentes avec des systèmes de chauffage identiques (serpentin et thermopompe). La plus grande serre (S2) a une consigne de chauffage plus élevée (5°C) que la plus petite serre (S1) (-3°C). La déshumidification est activée sur la base d'un temps de marche du ventilateur à pression positive précédé du démarrage du chauffage avec la thermopompe et/ou le serpentin. Les thermopompes peuvent fonctionner jusqu'à des températures entre -9 et -14°C. Le système d'acquisition de données indique les conditions de température et d'humidité de la serre, ainsi que les périodes de commande des équipements de chauffage et de ventilation. Il n'était donc pas possible de connaître avec certitude à quel moment les thermopompes étaient hors-fonction à cause des températures trop froides sauf en validant les temps de marche démesurés des serpentins. Les données météorologiques extérieures ont été recueillies à partir du site Agrométéo Québec (<https://www.agrometeo.org>) à partir de la station de Stanstead, site le plus près et disposant des données d'ensoleillement. Les données climatiques ont été analysées du 1^{er} novembre 2024 au 15 mars 2025.

2) Méthodologie d'analyse des données

Les données journalières pour chaque période d'analyses ont été triées en fonction d'une matrice de journées types basés sur les pertes thermiques et les gains thermiques (ensoleillement). Ainsi, pour les jours et pour les nuits, les deux premiers facteurs discriminants étaient la température minimale suivi de la vitesse des vents. L'analyse des données nous a aussi forcé à discriminer l'effet de la couverture nuageuse de nuit et/ou les précipitations de pluie ou de neige. Les conditions de jours discriminaient aussi la luminosité. Chaque discriminant était divisé en deux groupes, soit faible ou forte (température, vent, luminosité de jour) en ne conservant qu'un maximum de 4 journées types pour chaque condition globale remplie; afin de maximiser les écarts des conditions comparés pour analyse.

3) Résultats et discussions

a) Site de l'INAB (données du 1^{er} octobre au 5 décembre 2023)

Les températures extérieures clémentes du début de l'hiver 2023-2024 n'ont pas exigés l'utilisation des couvertures flottantes, ni l'effet discriminatoire des températures extérieures, puisque les températures extérieures étaient presque toujours supérieures à la température de chauffage de la serre N-O, soit 0°C. Nos analyses se sont donc concentrées sur l'impact des effets d'ombrage de la serre S-E

sur la serre N-O. La figure ci-dessous compare les luminosités des deux serres le 31 octobre 2023.

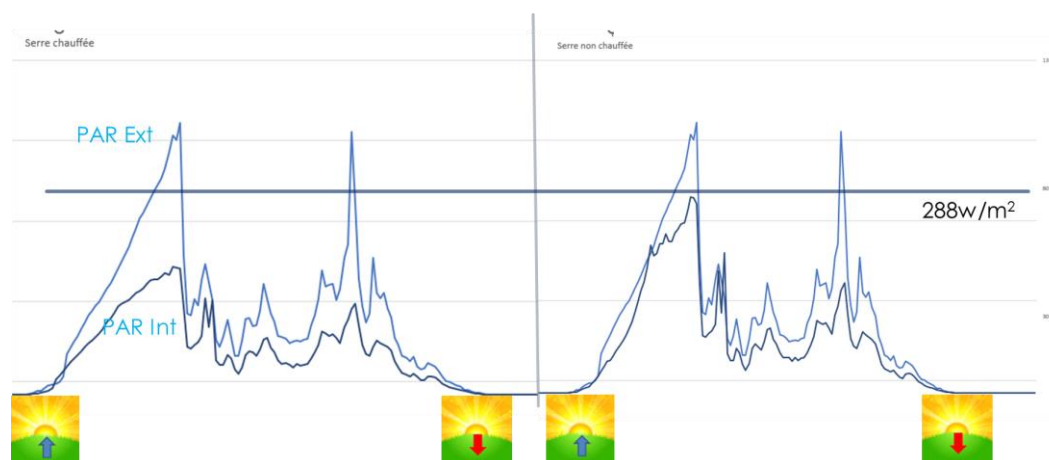


Figure 1 : Luminosité (W/m²) de la serre chauffée et de la serre non chauffée, le 31 octobre 2023, au site de l'INAB.

La serre non-chauffée (S-E) obtient un pic d'ensoleillement de près de 288 W/m² (ligne bleu foncé) en milieu de matinée (soleil perpendiculaire à la serre) alors que la serre chauffée obtient près de la moitié de cette valeur. Nous avons par la suite évalué sur différents types d'ensoleillement les pertes lumineuses pour chaque serre en fonction de l'ensoleillement extérieur (tableau 1). Il ressort que la serre S-E accuse une perte de 24 à 38% par temps ensoleillé, 18 à 26% par ciel clair et moins de 10% par temps nuageux. En tenant de la couverture nuageuse habituelle dans le sud du Québec, nous estimons que la perte moyenne d'octobre à février est de l'ordre de 25% sous ces conditions (annexe 1 photo 9). Il serait donc important de considérer les effets d'ombrages entre les serres sous les faibles angles solaires hivernaux lors de l'installation des serres pour la production hivernale.

Tableau 1 : Résumé des conditions climatiques extérieures et estimation des pertes lumineuses causées par l'orientation de la serres chauffée et non chauffée au site de l'INAB

Date	Condition	Serre		Écart
		Chauffée	Non-chauffée	
2023-11-16	Soleil	45%	59%	24%
2023-11-21	Soleil	40%	64%	38%
2023-10-31	Mi-soleil	58%	70%	18%
2023-11-01	Mi-soleil	47%	63%	26%
2023-11-23	Nuage	64%	69%	7%
2023-11-27	Nuage	69%	71%	3%

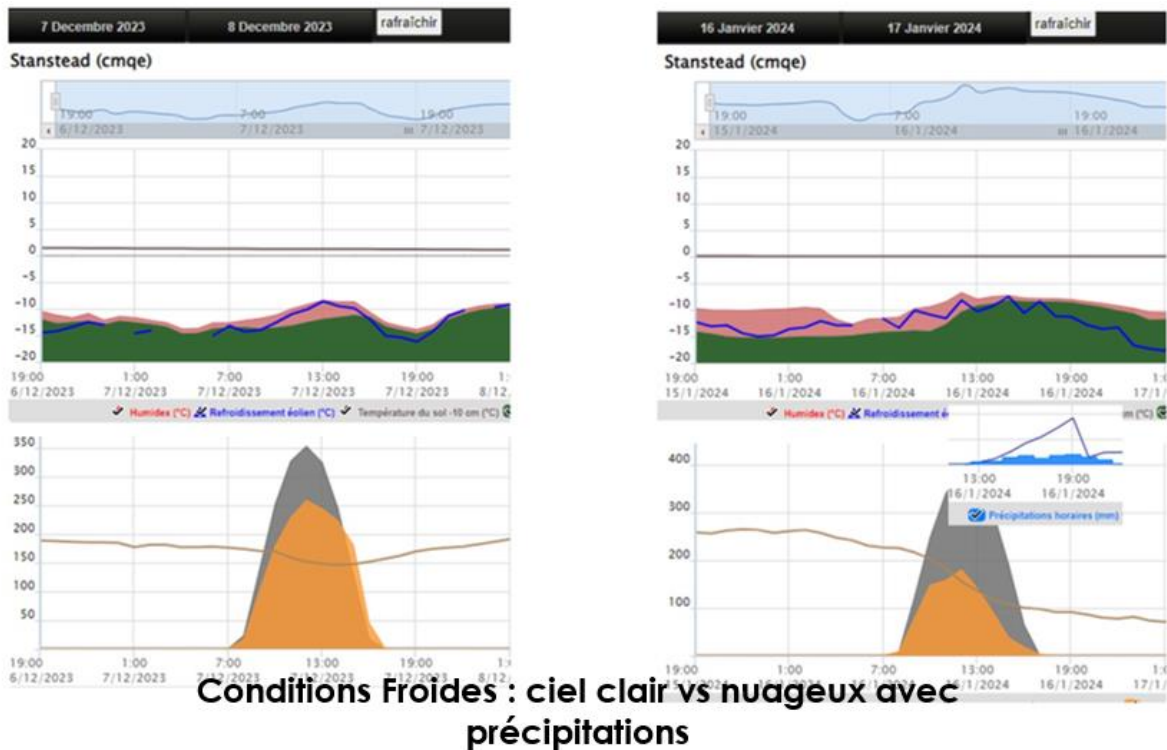
b) Site de la Boîte à Légumes

Considérant les particularités des deux serres, les caractéristiques des deux serres ont été ramenées sur la base unitaire de surface (m^2) (tableau ci-dessous). Les données indiquent que la serre chaude (2E-O) dispose de 25% moins de capacité de chauffe et 33% moins de capacité de ventilation que la serre froide, ce qui indique que les installations ne sont pas complètement cohérentes avec l'allocation des superficies. Notons par ailleurs qu'une serre orientée est-ouest comme la serre 2 devrait mieux profiter du soleil et être moins exposé aux vents froid qu'une serre nord-sud telle que la serre 1. Par ailleurs, le producteur pouvait mettre en marche 50 ou 100% de ses serpentins électriques, 100% étant les capacités indiquées entre parenthèses.

Tableau 2 : Caractéristiques des serres à l'étude, au site La Boîte à légumes

Caractéristique de la serre	Serre	
	1 N-S	2 E-O
Superficie (m^2)	220	292
Chauffage J/N (°C)	0/-3	5/3
Ventilation J/N (°C)	16/7	16/7
Puissance chauffage (Btu/ m^2)	465	350
Delta T attendue (°C)	19 (38)	14,6 (29,2)
Température ext minimum (°C)	-22 (-41)	-11,6 (-23,2)
Puissance Thermopompe	155	116
Puissance ventilation (Changements d'air/hr)	6	4
Déshumidification	Pulse thermopompe + ventilation, serpentin au besoin	

Selon le classement par journées types, nous avons obtenus des résultats très divergents sur la capacité d'atteindre les consignes de chauffage et de déshumidification pour des journées typiquement similaires. L'analyse des données climatiques régionales indiquent que ce sont les facteurs de nébulosité et de précipitation qui semblent avoir impactés les besoins thermiques des serres. La figure 2 compare 2 journées, le 7 décembre 2023 et le 16 janvier 2024.



Conditions Froides : ciel clair vs nuageux avec précipitations

Figure 2 : Graphiques démontrant les conditions climatiques extérieures une journée type froide en comparant le 7 décembre dont le ciel était clair et le 16 janvier dont le couvert était nuageux avec précipitations débutant à 13 h.

La zone verte pleine au centre indique la température (°C) au sol (10cm), la zone orange pleine en bas indique l'intensité lumineuse (W/m²), la ligne brune en bas indique la pression barométrique et nous avons inclus en bas à droite les précipitations instantanées et cumulatives aux heures indiquées. Le 7 décembre 2023 fut un ciel clair de nuit et ensoleillé de jour alors que le 16 janvier 2024 fut un ciel nuageux avec de légères précipitations de neige entre 13h00 et 15h00. La température extérieure était similaire avec une vitesse de vents faibles.

La figure 3 présente les conditions climatiques dans la serre et l'utilisation des équipements dans la serre.

7 décembre 2023 Serre 1 N-S (froide)

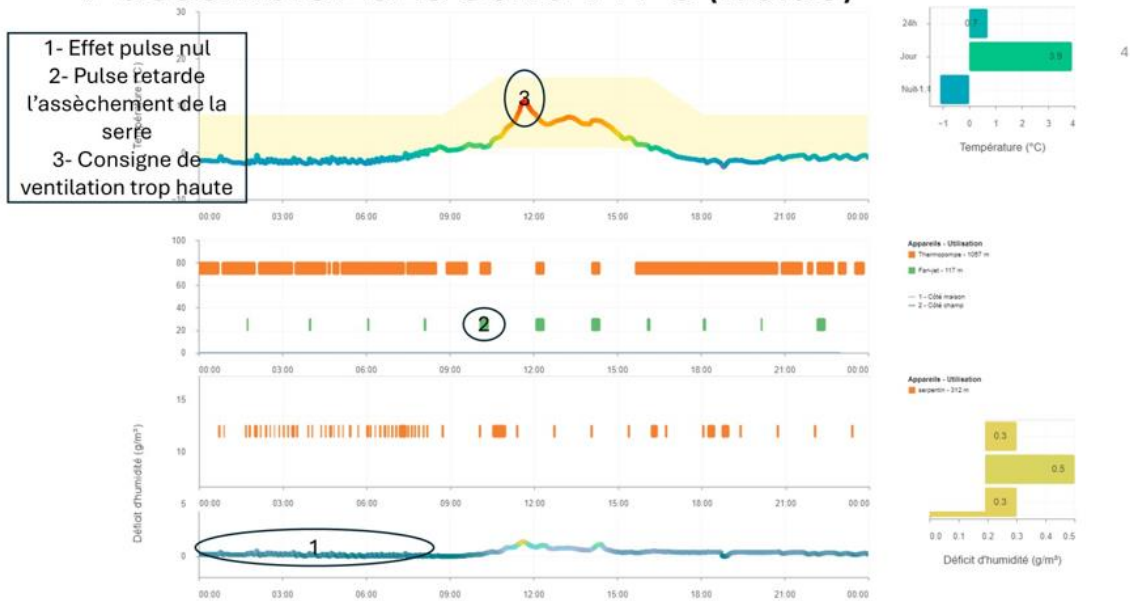


Figure 3 : Graphiques des conditions climatiques dans la serre le 7 décembre 2023, par ciel clair, dans la serre froide (consigne 0°C le jour et -3°C la nuit) au site de La Boîte à légumes

Le graphique du haut indique la température de l'air dans la serre (ligne bleu tirant vers le rouge) et la plage de consigne de température entre la ventilation et le chauffage en zone pleine beige. Le graphique du centre haut indique en orange la mise en marche de la thermopompe, et en vert la mise en marche de la ventilation. Le graphique du centre bas indique en orange la mise en marche du serpent. Le graphique du bas indique le déficit d'humidité de la serre (g/m³). Dans la serre froide sous ciel clair, les pulses de déshumidification de nuit (indiqué par les mises en marche de la ventilation) n'ont eu aucun effet sur le déficit d'humidité (point 1). Après le lever du soleil (point 2), la mise en marche de la ventilation pour déshumidifier a empêchée la hausse de température et la hausse du déficit d'humidité, ce qui va à l'encontre de l'objectif de déshumidifier, soit d'assécher la serre. Au point 3, la hausse de température générée par le soleil n'a pas été utilisée pour déshumidifier puisque la consigne de ventilation n'a jamais été dépassée. Notons que pour cette journée, le déficit d'humidité n'a jamais excédé 0.5g/m³, ce qui signifie habituellement que les efforts consentis n'ont absolument rien donnés, s'il est considéré que l'objectif minimal devrait se situer à près de 2 g/m³ pour assurer un contrôle adéquat des maladies.

Cette même serre a eu un comportement très différent la journée du 16 janvier 2024 par temps nuageux avec précipitations (Figure 4). Les pulses de nuit (2h30 et 6h30) ont permis une hausse de la température en plus d'augmenter significativement le déficit d'humidité et les pulses de jours ont aussi eu un bel effet. Enfin, les pulses de déshumidification en fin de journée (18h30 et 22h30) ont même forcés la ventilation, probablement à cause de la couverture de neige sur les toits. La rétention des infrarouges longs et l'isolation de la neige sont des phénomènes assez bien connus en thermodynamique et semblent le mieux expliqué les différences observées lors de ces deux journées. Notons que ces phénomènes ont été redondants pour les autres journées similaires.

Dans la serre chaude (annexe 1 photo 13 et 15), les conditions climatiques obtenues le 7 décembre 2023 sont pratiquement identiques à la serre froide. Cependant, la journée du 16 janvier 2024, l'obtention d'une déshumidification efficace a été difficile. La température de la serre de nuit a toujours oscillé entre le dessous et le dessus de la consigne et légèrement au dessus de la consigne durant le jour, malgré l'orientation est-ouest. La puissance de chauffe plus faible de cette serre semble l'explication la plus plausible de cette différence dans l'atteinte des résultats.

L'effet de l'orientation de la serre sur la capacité de réchauffement solaire de la serre a été analysé (Annexe 1 diapo 16). La température de la serre 1 N-S s'est moins bien maintenue que celle de la serre 2 E-O, ce qui peut s'expliquer par l'exposition plus forte de cette dernière au soleil.

7

de chauffage de -3°C. Il est clair que le plus fort assèchement (déficit d'humidité) de la culture est créée par la hausse de température alors que la façon la plus facile de sortir l'humidité par temps très froid est de ventiler à basse température dans la serre. Il faudrait donc sortir l'humidité par temps froid sans créer de hausse de température et ensuite assécher la culture en augmentant la température ou, à l'inverse, hausser la température et la laisser descendre avant de ventiler. Il y a donc une réflexion à faire sur la méthode de déshumidification à employer.

Contribution de Mère Nature :

- Effet pluie : Dans la nuit du 27 novembre 2023 (annexe 1 photo 22), les températures de la serre sont passées de plus basses que les températures extérieures vers 22h00 pour ensuite augmenter au dessus de la température extérieure. Notre analyse des données météo indique que des précipitations de pluies sont survenues au moment de la hausse, ce qui laisse présager encore une fois l'effet de la rétention des infrarouges.
- Inversion de température : Dans la nuit du 30 novembre au 1^{er} décembre 2023 (annexe 1 photo 23), la température de la serre a toujours été inférieure à la température extérieure. Il aurait donc été possible de réchauffer la serre par la ventilation.

Autres considérations :

Les producteurs indiquent que les cultures d'épinard sont peu sensibles aux maladies telles la moisissure grise ou le sclérotinia comparativement aux cultures de laitues qui sont très sensibles. Cependant, l'épinard est normalement cultivée en condition froide inférieure à 0°C alors que les laitues sont généralement cultivées à des températures supérieures à 3°C. La littérature semble indiquer que les deux maladies ciblées sont au stade dormant sous les conditions froides et que leur activité débute autour de 1 à 5°C. Il semble donc que les températures froides soient une méthode d'évitement des maladies, bien plus que le type de culture. Par ailleurs, notons que les coupes de laitues sont souvent responsables du développement des maladies mais les producteurs ne font aucune action ciblée pour permettre la cicatrisation des blessures avant que l'infection puisse se produire. Dans les cultures chaudes qui subissent des tailles de feuilles régulièrement, des méthodes précises existent (s'assurer que la plante transpire et va transpirer pour environ 5 heures après une coupe (conditions de jours sous humidités contrôlées), technique de coupe précise sur la plante, température minimale favorisant la cicatrisation) pour éviter ces maladies.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

La conception des serres doit être conçues spécifiquement pour la production en culture froide (novembre à avril).

- Orientation des serres : Favoriser l'orientation est-ouest pour une meilleure transmission lumineuse
- Distance entre les serres en hiver: Tenir compte des facteurs d'ombrage différents en hiver comparativement à la période estivale et éviter de cultiver dans les serres qui subissent l'ombrage des serres adjacentes (voir : La construction des serres et abri, Ctifl 2000 p. 56-57)

- La puissance de chauffage requise doit être validée pour la saison froide. De même, la capacité de modulation du chauffage est plus critique en conditions froides qu'en condition chaude, ce qui entraîne des fluctuations thermiques importantes et ainsi des dépenses énergétiques inutiles.
- Les méthodes de ventilation en conditions chaudes ne sont pas adaptées aux conditions froides. Ces méthodes sont soit inutilisables (ouvrants latéraux), soit trop agressives en conditions froides et peu lumineuses ou la nuit, ou pas assez agressives pour maintenir le contrôle des températures sous fortes luminosités hivernales. Selon notre estimation, les besoins en chauffage et en ventilation devraient se situer dans les plages présentées au tableau 3.

Tableau 3 : Estimation des besoins en chauffage et ventilation requis pour une serre minimalement chauffée au Québec

Serre (chaude ou froide)									
Consigne affectée	Système affecté	Jour				Nuit			
		Soleil		Nuage		Ciel clair		Nuage ou précipitation	
		Chaud	Froid	Chaud	Froid	Chaud	Froid	Chaud	Froid
Température	Puissance de chauffe (delta T (°C))	0	10	0	20	0	30	10	25
	Puissance de ventilation (ch d'air/hr)	6	6	6	3	2	1	3	1
Humidité	Puissance de chauffe (delta T (°C))	+10	+10	+10	+10	+10	+10	+10	+10
	Puissance de ventilation (ch d'air/hr)	6	6	6	2	3	1	4	2

- Une charte du calculs (annexe 2) de déficit d'humidité (DH) en conditions froides est un outil d'aide à la décision à fournir (Humidité absolue et DH de 10 à -20)
- Efficacité des pratiques de déshumidification : Malgré des objectifs mal définis, les actions réalisées ne donnent même pas les résultats attendus.

Questionnements non-répondus dans le projet :

- Précision, disponibilité et adaptation des capteurs en conditions froides (p. ex. bulbe humide qui gèle dans cage aspirante)
- Positionnement et choix des capteurs (quoi mesurer et où)
- Opération et gestion des équipements en conditions froides (p. ex. thermopompe) (hors service en conditions trop froides)
- Méthodes de conservation de l'énergie thermique
- Gestion des irrigations
- Ravageurs et maladies
 - Conditions de développement des différentes ravageurs et maladies rencontrés en cultures froides
 - Conditions d'application des produits phytosanitaires et des agents de lutte biologique

QUESTIONS À RÉPONDRE DANS UN FUTUR PROJET

- Préciser les consignes de températures optimales visées par espèce végétale, en fonction de la luminosité
- Établir les relations de causes à effet entre l'humidité et le développement des maladies
- Identifier des stratégies à appliquer pour éviter la contamination des blessures créées par les coupes successives.
- Faire une évaluation quantitative et qualitative des pratiques de déshumidification pour estimer le besoin en déshumidification des cultures froides
- Évaluer les coûts des pratiques de déshumidification
- Évaluer la teneur en eau du sol en période hivernale et préciser les consignes de tension visées pour orienter les irrigations

INDICATEURS DE RÉSULTATS DU PROJET;

- Nombre de rencontres tenues : 4 rencontres
- Nombre de participants aux rencontres : 9 producteurs et 7 à 8 intervenants provenant de 5 organisations (Climax conseils, MAPAQ, INAB, ETS, Pleine Terre)
- Nombre d'entreprises sondées pour le projet : 5 entreprises
- Nombre d'entreprises visées par les résultats du projet : au niveau régional : 12 à 15 entreprises, au niveau provincial environ une cinquantaine d'entreprises.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

- La conception du site de production et des serres doivent tenir compte de son utilisation en hiver en cultures froides.
- Le modèle de gestion du contrôle de l'humidité basé sur le temps de marche des équipements est rarement efficace et coûteux.
- La gestion du climat de la serre devrait être mieux adaptée aux conditions climatiques extérieures.

DIFFUSION

Visibilité donnée au projet et à ses résultats :

- Neuf entreprises en Estrie ont participé activement aux discussions et aux constats de ce projet
- Présentation au colloque maraîcher en serre le 19 novembre 2024 (annexe 1)
- Rapport sera déposé sur agriréseau

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Jacques Thériault, agronome M.Sc. Climax conseils
jacques.climaxconseils@gmail.com

Geneviève Legault, agronome, MAPAQ de l'Estrie
genevieve.legault@mapaq.gouv.qc.ca

REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES

- Institut national d'agriculture biologique (INAB)
- La Boîte à légumes
- Danielle Monfet et l'équipe du laboratoire thermique et science du bâtiment de l'École de technologie supérieure (ÉTS)
- Les conseillers et producteurs participants pour le partage de leurs observations

ANNEXE(S)

- 1- Optimisation de la gestion du climat en cultures froides : bien s'installer pour bien réussir, Thériault, J., Colloque Maraîcher 2024
- 2- Charte Humidité absolue et DH de 10 à -20

Références citées

- La construction des serres et abris, Ctifl 2000

OPTIMISATION DE LA GESTION DU CLIMAT EN CULTURES FROIDES : BIEN S'INSTALLER POUR BIEN RÉUSSIR

Jacques Thériault agr. M. Sc.
Climax Conseils



CLIMAX
CONSEILS

PLAN DE LA PRÉSENTATION

- 1- Historique du projet
- 2- Objectifs du projet
- 3- Présentation des sites à l'étude
- 4- Analyses de cas
 - INAB
 - Effets d'ombrage
 - La boîte à légumes
 - La gestion climatique
 - Révision du design des systèmes de chauffage et de ventilation
 - La contribution de Mère-Nature
- 5- Conclusion
- 6- Remerciements



► 1- Historique du projet : Serres froides et minimalement chauffées

- Stratégie de croissance des serres 2020-2025
 - Disponibilité de produits sur une plus longue période
- Une quinzaine d'entreprises en Estrie
- Déjà plusieurs travaux des Centres d'expertise et MAPAQ
 - CETAB+, CRAM
 - Fiches techniques MAPAQ
- Encore beaucoup de questions à répondre
 - Rendements instables
 - Problèmes phytosanitaires
 - Coûts de chauffage mal maîtriser



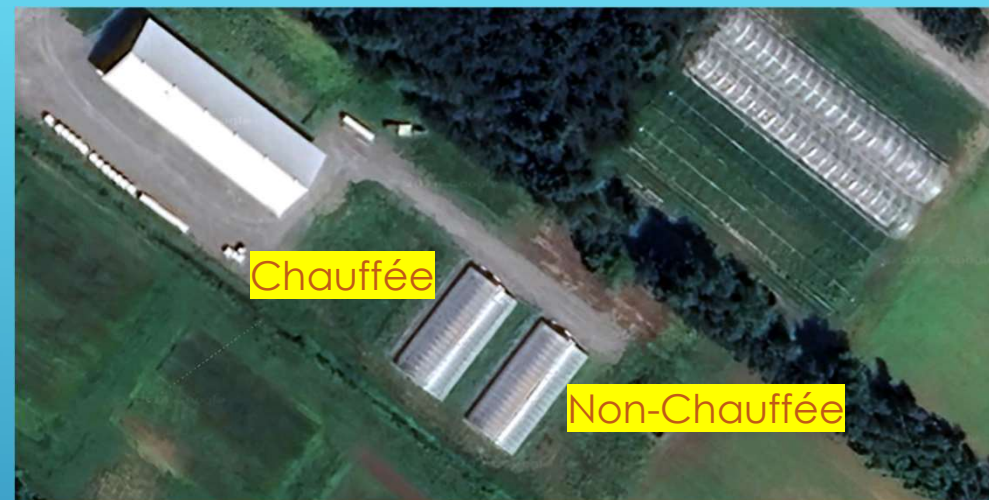
► 2- Objectifs du projet :

- Bâtir une expertise intégrant agronomie et thermodynamique
- Impact des pratiques de gestion climatique sur l'atteinte des objectifs
- Amélioration des pratiques du producteur
- Réduction des coûts de chauffage
- Plus grande adhésion des entreprises à la production de légumes-feuilles en conditions froides

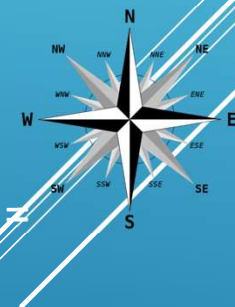


3- PRÉSENTATION DES SITES À L'ÉTUDE : L'INAB

- ▶ Serre chauffée (N-O)
 - ▶ T° chauffage = 0°C
 - ▶ T° ventilation (pression positive) = 15°C
 - ▶ Consigne de déshumidification = 10 min aux 2 heures pendant la nuit avec pression positive et chauffage + 10 min après lever du soleil



- ▶ Serre non chauffée (S-E)
 - ▶ T° chauffage = aucune
 - ▶ T° ventilation (pression positive) = idem de l'air ambiant



Température intérieure serre	Nb de couvertures flottantes
0°C	1e P30
-3°C	2e P30
-7°C	3e P30
-12°C	4e P30



3- PRÉSENTATION DES SITES À L'ÉTUDE : LA BOÎTE À LÉGUMES

Chauffage (identique dans les deux serres)

Thermopompe (TP)

Gel de l'échangeur vers -9 à -14°C

COP par constant (10kW puissance d'entrée)

Serpentin

60 kW (50-100%)

Tarif interruptible (1 fois cet hiver)

2 serres de dimension variable

S1 N-S- Serre à -3°C : petite = 220 m²

S2 E-O- Serre à 5°C : grande = 292 m²

Ventilation à pression positive

Déshumidification programmée avec TP et serpentin

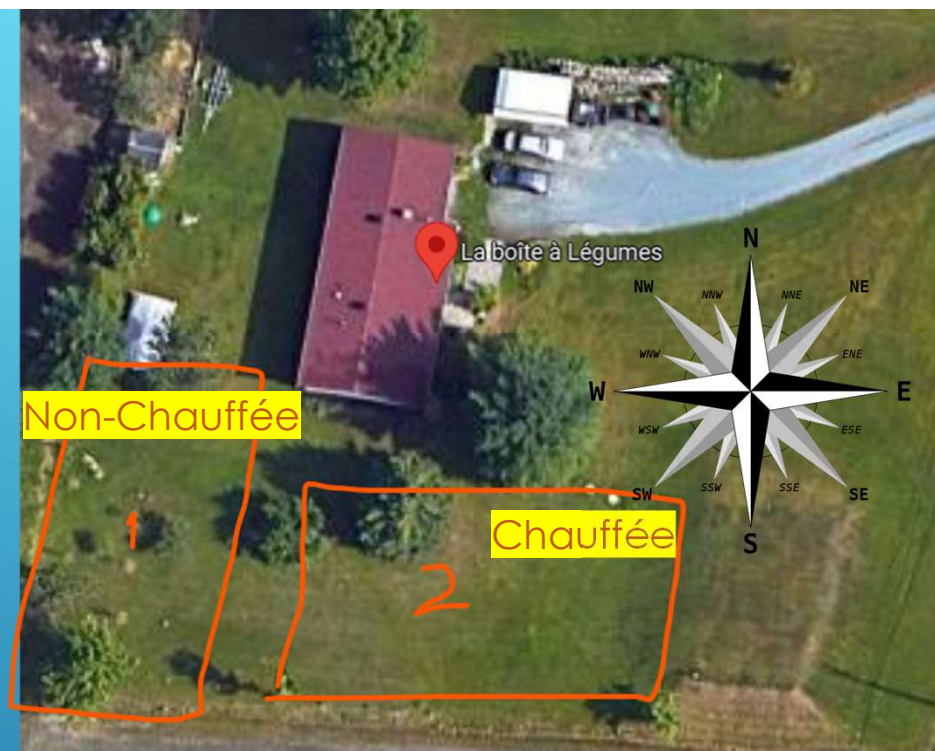


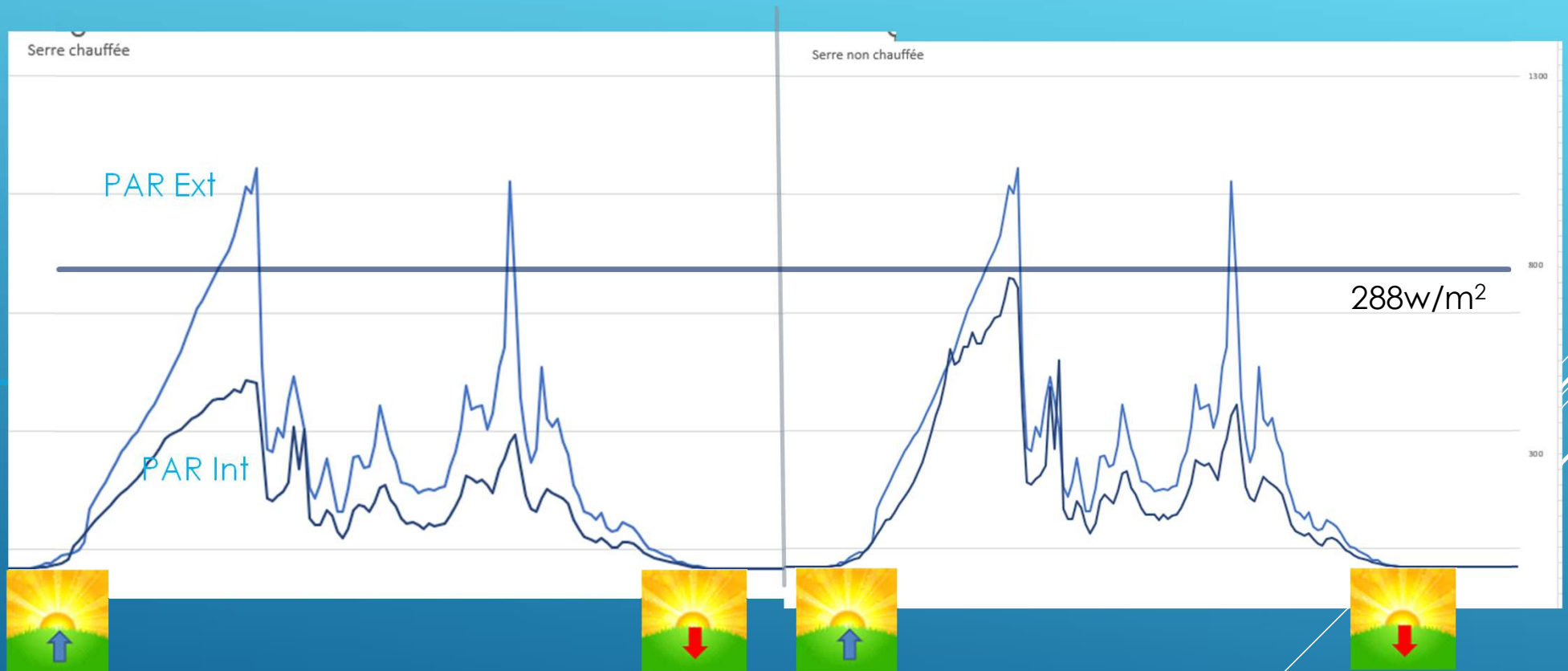
FIG. 2.3 Parcours apparent du soleil aux équinoxes (21 mars et 21 septembre) et aux solstices (21 décembre et 21 juin) à Bruxelles. Ce graphique est pratiquement valable au nord de la Loire.

FIG. 2.4 Direction et longueur des ombres selon l'heure et la latitude (pour une hauteur de l'obstacle de 1 m). Heures TSV

FIG. 2.5 Direction et longueur des ombres selon l'heure et la latitude (pour une hauteur de l'obstacle de 1 m). Heures TSV

Diagramme de l'azimut des rayons du soleil à l'équinoxe d'automne (21 septembre) pour différentes latitudes. Le diagramme est basé sur un système de coordonnées polaires où l'angle radial représente l'azimut (de 0° à 180°) et les arcs concentriques représentent les hauteurs du soleil (de 0° à 90°). Les directions Nord, Sud, Ouest et Est sont indiquées. Les heures solaires sont marquées par des lignes radiales (10 h, 11 h, 12 h, 13 h, 14 h). Les latitudes indiquées sont 49°, 47°, 45° et 43°. Les courbes de hauteur du soleil sont étiquetées avec des valeurs L = 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2. Des flèches indiquent la direction des rayons du soleil pour les latitudes de Paris, Valence, Perpignan et Nantes. Le diagramme illustre que plus la latitude est élevée, plus la hauteur du soleil est faible à une même heure.

L'INAB: EFFETS D'OMBRAJE 31 OCTOBRE 2023



INAB: EFFETS D'OMBRE

Date	Condition	Serre		Écart
		Chauffée	Non-chauffée	
2023-11-16	Soleil	45%	59%	24%
2023-11-21	Soleil	40%	64%	38%
2023-10-31	Mi-soleil	58%	70%	18%
2023-11-01	Mi-soleil	47%	63%	26%
2023-11-23	Nuage	64%	69%	7%
2023-11-27	Nuage	69%	71%	3%



Couverture nuageuse moyenne octobre à février : 77%

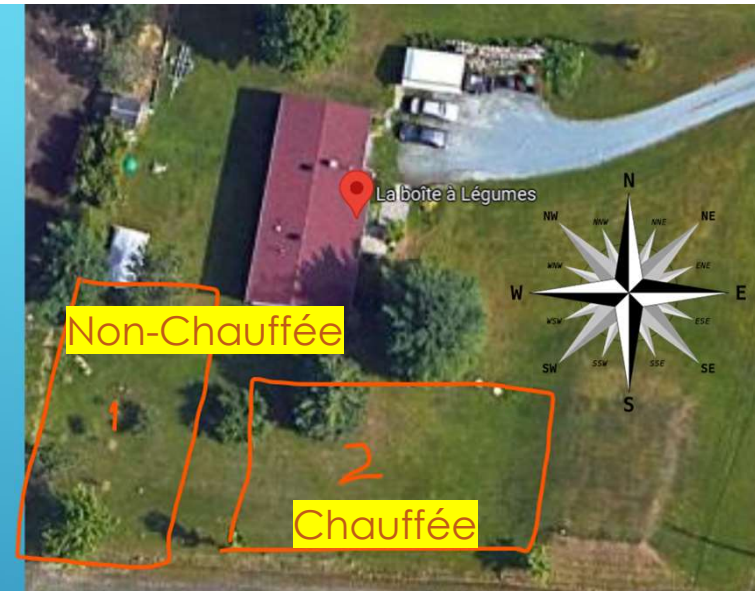
J'aime les mathématiques : $77\% \times 5\% \times 1 \text{ LUM} + 23\% \times 30\% \times 3 \text{ LUM} = 3,85\% + 20,7\% = 24,55\%$

Imaginez deux serres orientées Est-Ouest !!!
Quelle serre tenir chaude? Quelle serre tenir froide?



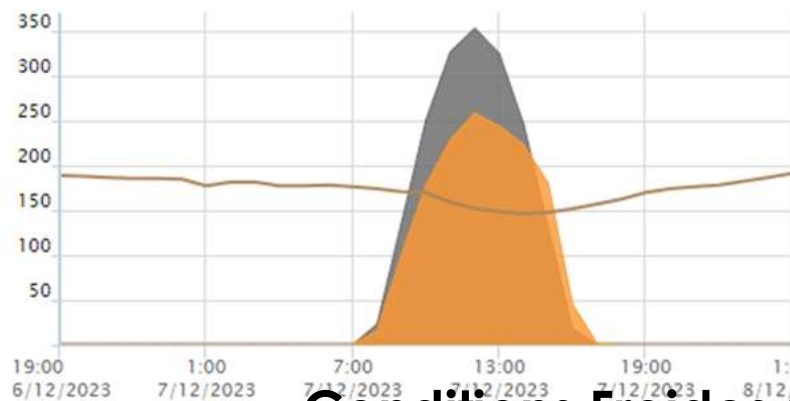
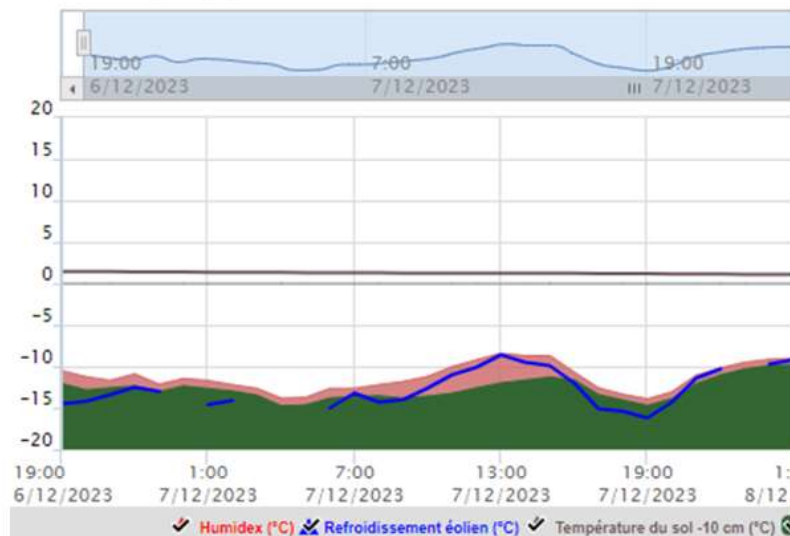
4- ANALYSE DE CAS : LA BOÎTE À LÉGUMES : CARACTÉRISTIQUES DES SERRES

Caractéristique de la serre	Serre	
	1 N-S	2 E_O
Superficie (m ²)	220	292
Chauffage J/N (°C)	0/-3	5/3
Ventilation J/N (°C)	16/7	16/7
Puissance chauffage (Btu/m ²)	465	350
Delta T attendu (°C)	19 (38)	14,6 (29,2)
Température ext minimum (°C)	-22 (-41)	-11,6 (-23,2)
Puissance Thermopompe	155	116
Puissance ventilation (Changements d'air/hr)	6	4
Déshumidification	Pulse thermopompe + ventilation, serpentins au besoin	



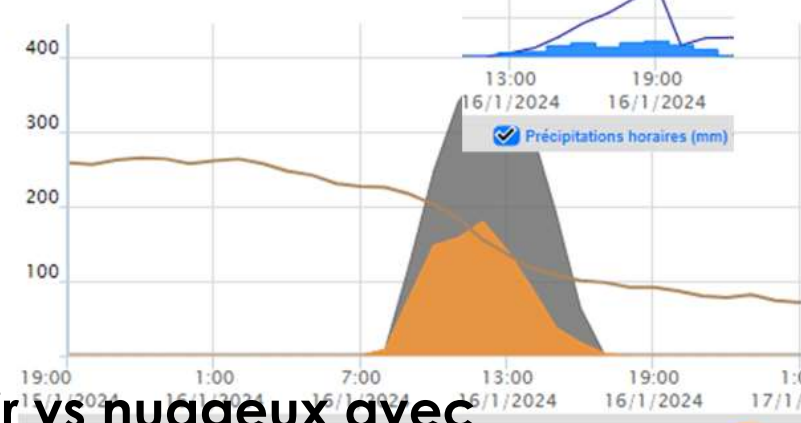
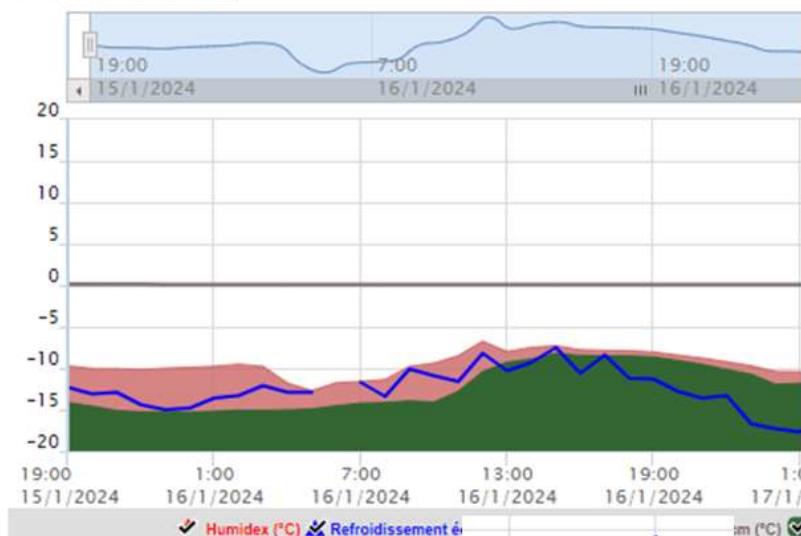
7 Decembre 2023 8 Decembre 2023 rafraichir

Stanstead (cmqe)



16 Janvier 2024 17 Janvier 2024 rafraichir

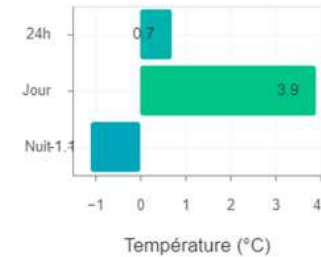
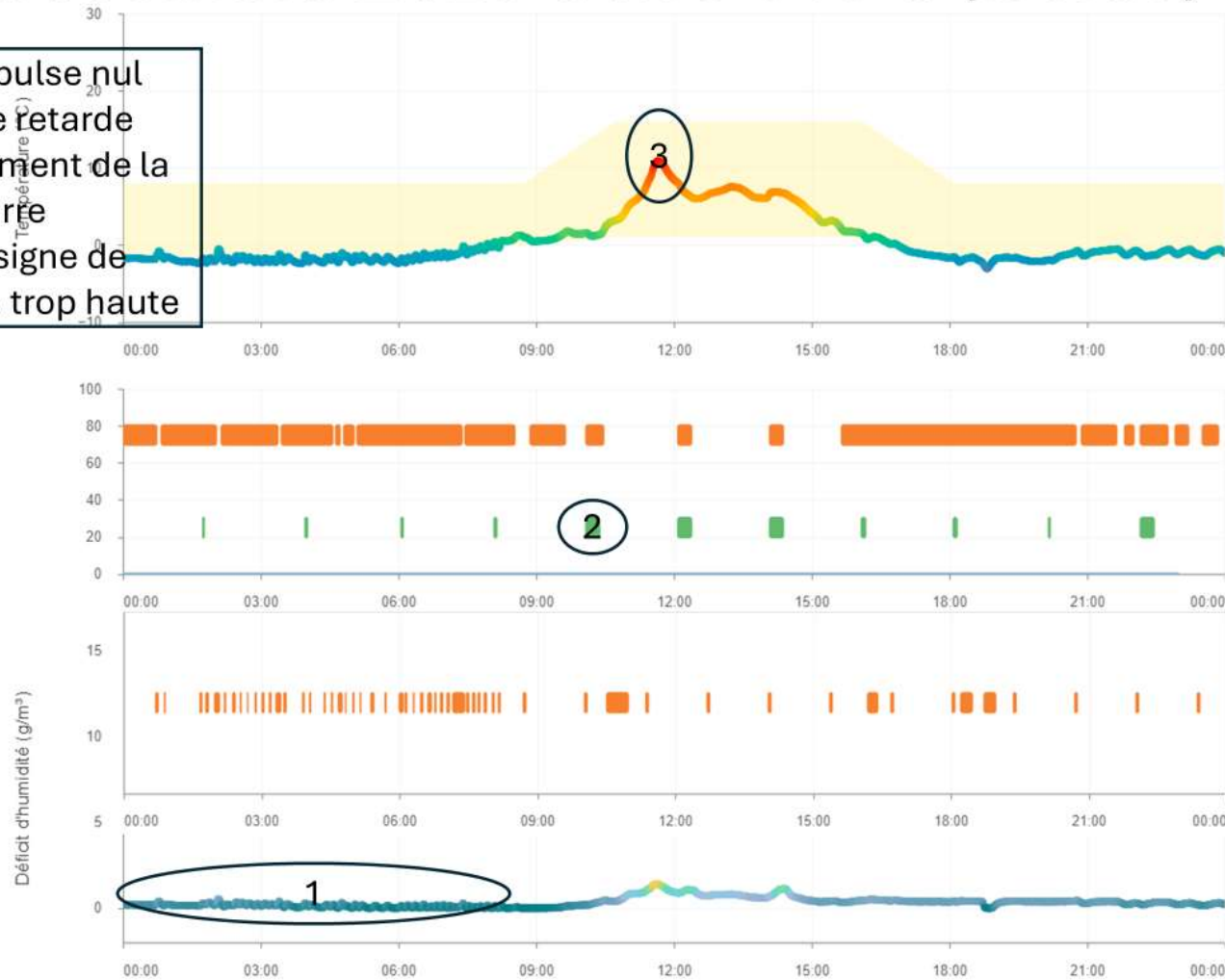
Stanstead (cmqe)



Conditions Froides : ciel clair vs nuageux avec précipitations

7 décembre 2023 Serre 1 N-S (froide)

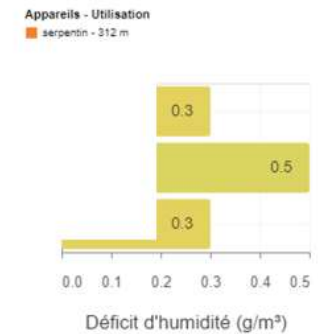
- 1- Effet pulse nul
- 2- Pulse retarde l'assèchement de la serre
- 3- Consigne de ventilation trop haute



Appareils - Utilisation

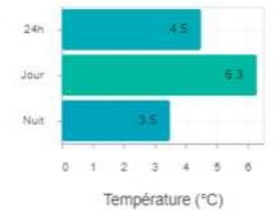
- Thermopompe - 1057 m
- Fan-jet - 117 m

1 - Côté maison
2 - Côté champ

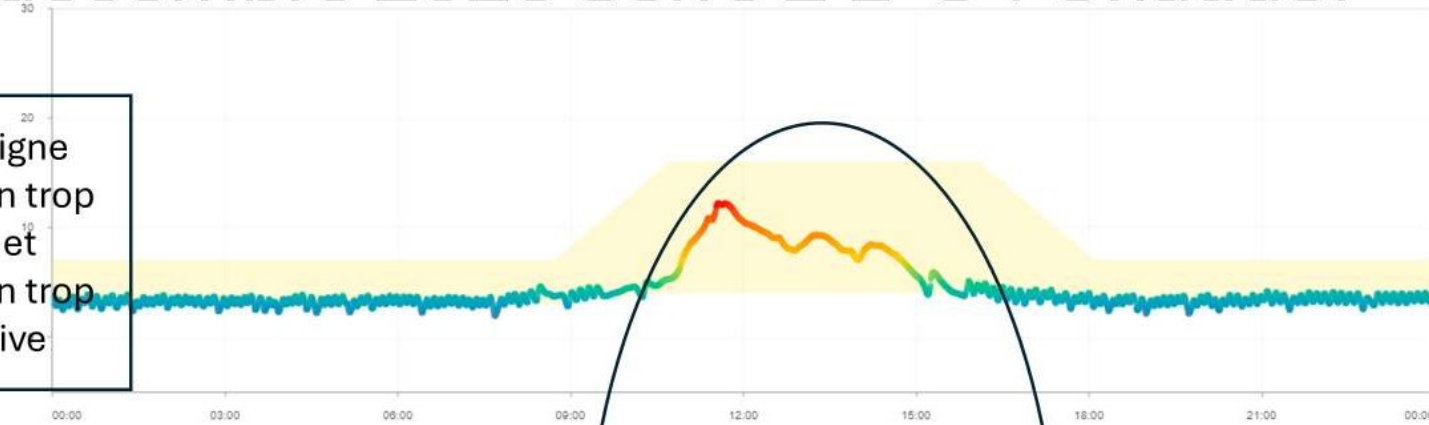


7 décembre 2023 Serre 2 E-O (Chaude)

2- Consigne ventilation trop haute et ventilation trop agressive

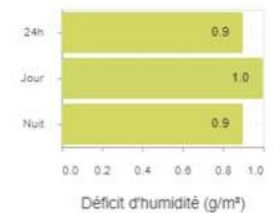


5



2

1- Aucun effet pulse



Déficit d'humidité (g/m³)

16 janvier 2024 Serre 1 N-S (Serre froide)

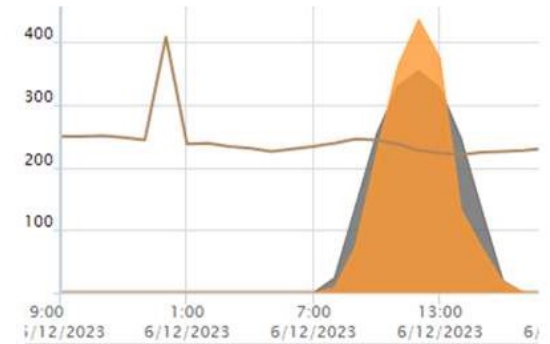


16 janvier 2024 Serre 2 E-O (Chaude)



Effet soleil sur température

Serre E-O
profite mieux
du soleil



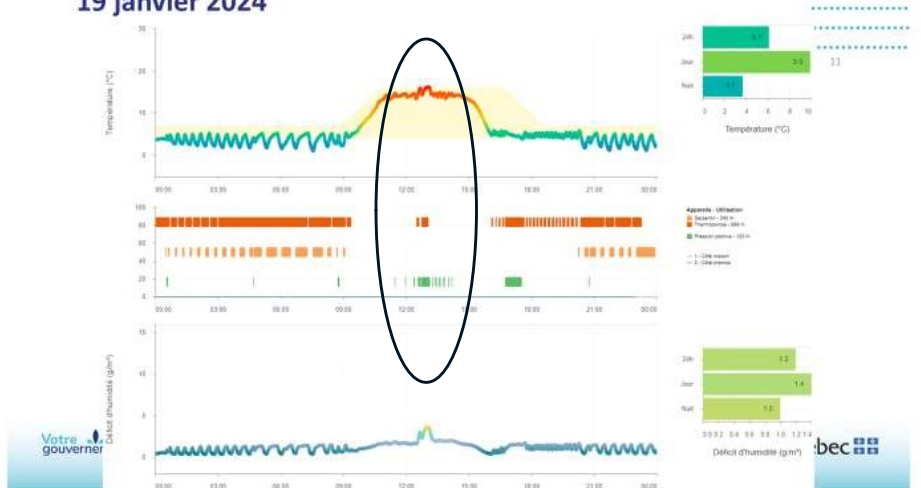
Serre froide N-S

Serre Chaude E-O

19 janvier 2024



19 janvier 2024



SERRE FROIDE-NUIT FROIDE EFFICACITÉ PULSE- NUIT

Ciel clair



Nuageux



Neige



Puissance du pulse à ajuster en
fonction des conditions extérieurs, ou
agir quand ça rapporte

SERRE CHAUDE-NUIT FROIDE-EFFET PULSE-NUIT

Ciel Clair



Nuageux

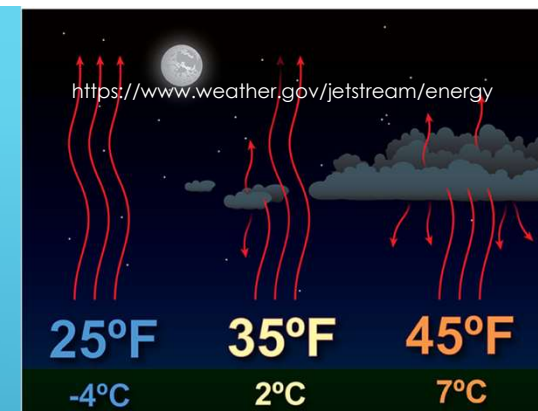


Neige



QUELQUES COMMENTAIRES

- ▶ Aucune serre ne permet une déshumidification adéquate en conditions froides avec forte perte radiative (nuit avec ciel clair).
 - ▶ La serre froide réussit mieux à faible perte radiative (chauffage plus puissant)
- ▶ La serre chaude est mal dimensionnée pour être définie comme « chaude »
- ▶ L'effet déshumidification est surtout assuré par la hausse de température
 - ▶ Chauffer est plus efficace que ventiler pour assécher la culture (situation de faible transpiration)
 - ▶ Ventilation trop forte assomme le chauffage et bloque la déshumidification
- ▶ L'orientation E-O favorise les gains thermiques par le soleil



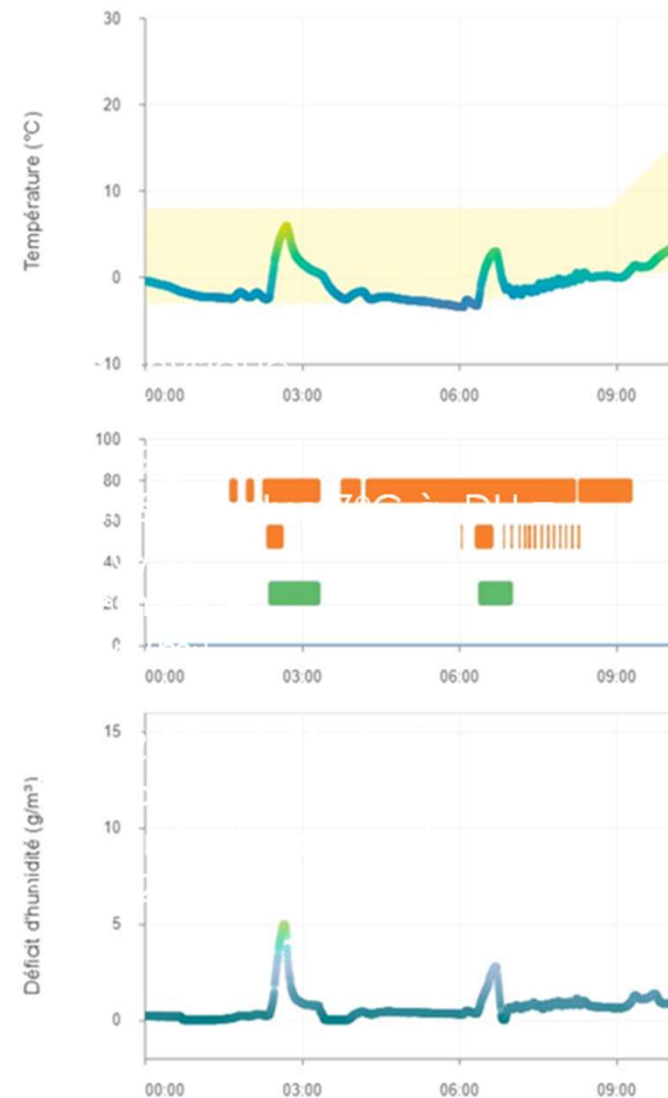
Un peu de mathématiques

Conditions de nuit extérieure:
Température -12 à -19°C,
HR = 80%, Humidité absolue (HA) = 1,1g/m³
(20°C, HR = 80% = 13,8g/m³)

- Analyse physique (Serre : 2 possibilités de ventilation)
- HA -3°C à DH=0 = 3,9g/m³
- HA 7°C à DH = 5 = 2,32g/m³
- Effet ventilation (1 ch. d'air : $HA_{int} - HA_{ext}$)
 - Serre à -3°C : $3,9 - 1,1 = 2,8\text{g/m}^3$
 - Serre à 7°C : $2,32 - 1,1 = 1,2\text{ g/m}^3$
 - Ratio : $2,8/1,2 = 2,33$ (coûte très cher)

Ventiler à fret et chauffer après?

S1(NS) - 19 janvier 2024 :



RÉVISION DU DESIGN DES SYSTÈMES DE CHAUFFAGE ET DE VENTILATION

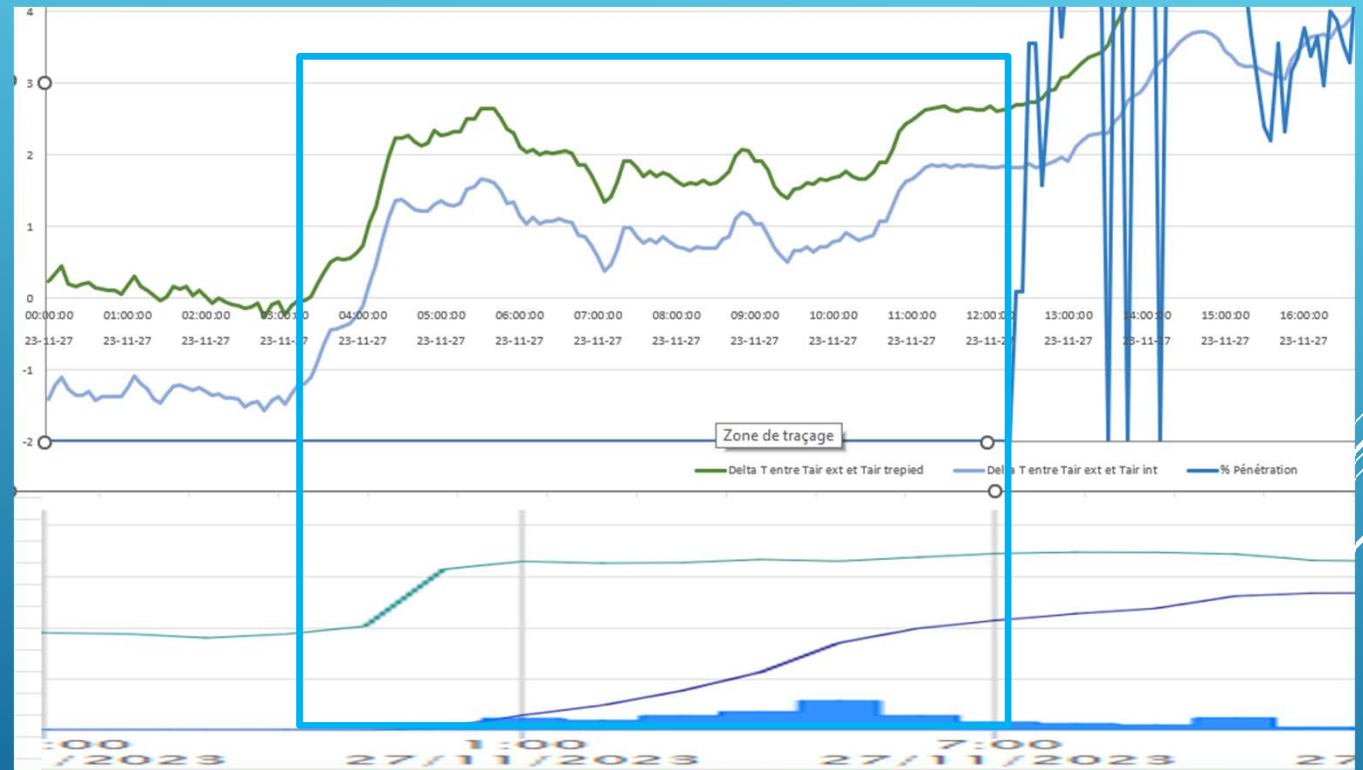
SUGGESTION : MATRICE DE PUISSANCE DES SYSTÈMES

Serre (chaude ou froide)									
Consigne affectée	Système affecté	Jour				Nuit			
		Soleil		Nuage		Ciel clair		Nuage ou précipitation	
		Chaud	Froid	Chaud	Froid	Chaud	Froid	Chaud	Froid
Température	Puissance de chauffe (delta T ($^{\circ}$ C))	0	10	0	20	0	30	10	25
	Puissance de ventilation (ch d'air/hr)	6	6	6	3	2	1	3	1
Humidité	Puissance de chauffe (delta T ($^{\circ}$ C))	+10	+10	+10	+10	+10	+10	+10	+10
	Puissance de ventilation (ch d'air/hr)	6	6	6	2	3	1	4	2

Capacité de modulation des équipements et/ou du système de contrôle

LA CONTRIBUTION DE MÈRE-NATURE

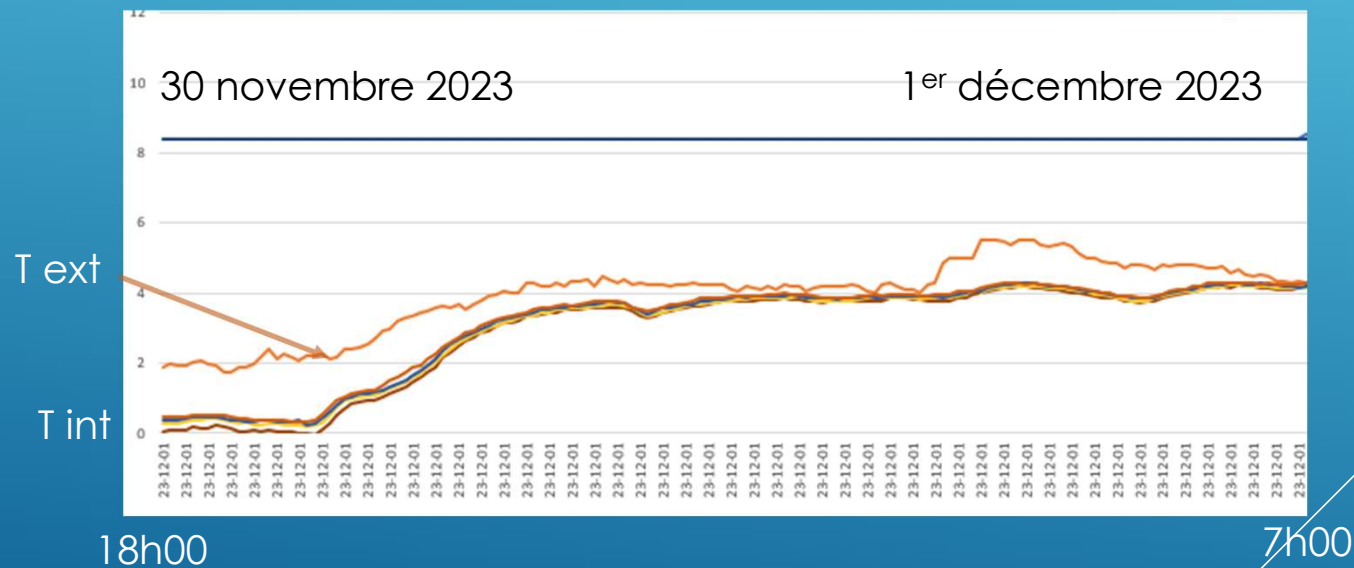
L'INAB
Effet pluie
(nuage)



Vents : 20km/hr soutenu

LA CONTRIBUTION DE MÈRE-NATURE

INAB : Serre chauffée et non-chauffée Inversion de température de 0h00 au lever du soleil
Effet radiatif ciel clair???



Pourquoi pas en profiter?

LA CONTRIBUTION DE MÈRE-NATURE



Crédit photo : Julien Venne, MAPAQ



Risques de maladies au froid

- Moisissure grise : Peut-être nul si $T^{\circ} < 0^{\circ}\text{C}$
 - Vitesse d'infection des spores ?
- Sclérotinia : Peut-être nul si $T^{\circ} < 5^{\circ}\text{C}$

Et si le froid était une bonne méthode de lutte???

Blessures de récoltes successives

- Récolter sec, garder sec et cicatriser avant de refroidir ?

RÉFLEXION : DÉSHUMIDIFIER POUR QUOI?

CONCLUSION

- Site de production
 - Penser lumière :
 - Facteurs d'ombrage
 - Orientation de la serre
- Équipements de serre
 - Prendre le temps de valider les puissances requises vs ce que vous avez
 - Serre chaude 3 saisons \neq serre froide
 - Ventilation modulante de 1 à 6 changements d'air/hr
 - Chauffage : Delta T aussi fort qu'en cultures chaudes 3 saisons dans certains cas

CONCLUSION

- Modèle de gestion
 - Ventiler à froid et humide pour sortir l'humidité?
 - Chauffer pour augmenter le DH (sécher les plants)
- Profiter des phénomènes météorologiques
 - Mieux connaître et utiliser les opportunités climatiques
 - Couverture nuageuse
 - Ensoleillement
 - Inversion de température

Cassandra Veillette
Producteur



Danielle Monfet
Professeure, Ing.,
Ph.D.



REMERCIEMENT

Charlotte Giard-Laliberté
agr. M. Sc.



Québec 

Philippe-Antoine Taillon agr.
Geneviève Legault agr. M.Sc.

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 (PADAAR)

MERCI DE VOTRE ATTENTION

Jacques Thériault agr. M. Sc.
jacques.climaxconseils@gmail.com
418-802-4316



Annexe 2
Charte d'humidité

Humidité absolue de l'air (g/m³)

Température	Humidité Relative (%)										
(°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	0	0,94	1,87	2,81	3,74	4,68	5,61	6,55	7,48	8,42	9,36
9	0	0,88	1,76	2,64	3,51	4,39	5,27	6,15	7,03	7,91	8,78
8	0	0,82	1,65	2,47	3,30	4,12	4,95	5,77	6,59	7,42	8,24
7	0	0,77	1,55	2,32	3,09	3,87	4,64	5,41	6,19	6,96	7,73
6	0	0,72	1,45	2,17	2,90	3,62	4,35	5,07	5,80	6,52	7,25
5	0	0,68	1,36	2,04	2,72	3,40	4,07	4,75	5,43	6,11	6,79
4	0	0,64	1,27	1,91	2,54	3,18	3,82	4,45	5,09	5,72	6,36
3	0	0,60	1,19	1,79	2,38	2,98	3,57	4,17	4,76	5,36	5,95
2	0	0,56	1,11	1,67	2,23	2,79	3,34	3,90	4,46	5,01	5,57
1	0	0,52	1,04	1,56	2,08	2,60	3,13	3,65	4,17	4,69	5,21
0	0	0,49	0,97	1,46	1,95	2,43	2,92	3,41	3,89	4,38	4,87
-1	0	0,45	0,90	1,35	1,79	2,24	2,69	3,14	3,59	4,04	4,49
-2	0	0,41	0,83	1,24	1,65	2,07	2,48	2,89	3,31	3,72	4,14
-3	0	0,39	0,78	1,17	1,56	1,94	2,33	2,72	3,11	3,50	3,89
-4	0	0,35	0,70	1,05	1,41	1,76	2,11	2,46	2,81	3,16	3,51
-5	0	0,32	0,65	0,97	1,30	1,62	1,94	2,27	2,59	2,91	3,24
-6	0	0,30	0,60	0,90	1,19	1,49	1,79	2,09	2,39	2,69	2,98
-7	0	0,28	0,55	0,83	1,10	1,38	1,65	1,93	2,20	2,48	2,75
-8	0	0,25	0,51	0,76	1,01	1,27	1,52	1,78	2,03	2,28	2,54
-9	0	0,23	0,47	0,70	0,94	1,17	1,40	1,64	1,87	2,11	2,34
-10	0	0,22	0,43	0,65	0,86	1,08	1,29	1,51	1,72	1,94	2,16
-11	0	0,20	0,39	0,59	0,78	0,98	1,18	1,37	1,57	1,76	1,96
-12	0	0,18	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,44	1,62	1,80
-13	0	0,17	0,33	0,50	0,66	0,83	0,99	1,16	1,32	1,49	1,65
-14	0	0,15	0,30	0,45	0,60	0,76	0,91	1,06	1,21	1,36	1,51
-15	0	0,14	0,28	0,41	0,55	0,69	0,83	0,97	1,10	1,24	1,38
-16	0	0,13	0,25	0,38	0,51	0,64	0,76	0,89	1,02	1,14	1,27
-17	0	0,12	0,23	0,35	0,46	0,58	0,69	0,81	0,92	1,04	1,15
-18	0	0,11	0,21	0,32	0,42	0,53	0,63	0,74	0,84	0,95	1,05
-19	0	0,10	0,19	0,29	0,38	0,48	0,58	0,67	0,77	0,86	0,96
-20	0	0,09	0,18	0,26	0,35	0,44	0,53	0,62	0,70	0,79	0,88

Annexe 2
Charte d'humidité

Déficit d'humidité de l'air (g/m³)

Température (°C)	Humidité Relative (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	9,356	8,42	7,48	6,55	5,61	4,68	3,74	2,81	1,87	0,94	0,00
9	8,784	7,91	7,03	6,15	5,27	4,39	3,51	2,64	1,76	0,88	0,00
8	8,243	7,42	6,59	5,77	4,95	4,12	3,30	2,47	1,65	0,82	0,00
7	7,732	6,96	6,19	5,41	4,64	3,87	3,09	2,32	1,55	0,77	0,00
6	7,246	6,52	5,80	5,07	4,35	3,62	2,90	2,17	1,45	0,72	0,00
5	6,79	6,11	5,43	4,75	4,07	3,40	2,72	2,04	1,36	0,68	0,00
4	6,359	5,72	5,09	4,45	3,82	3,18	2,54	1,91	1,27	0,64	0,00
3	5,953	5,36	4,76	4,17	3,57	2,98	2,38	1,79	1,19	0,60	0,00
2	5,57	5,01	4,46	3,90	3,34	2,79	2,23	1,67	1,11	0,56	0,00
1	5,209	4,69	4,17	3,65	3,13	2,60	2,08	1,56	1,04	0,52	0,00
0	4,868	4,38	3,89	3,41	2,92	2,43	1,95	1,46	0,97	0,49	0,00
-1	4,487	4,04	3,59	3,14	2,69	2,24	1,79	1,35	0,90	0,45	0,00
-2	4,135	3,72	3,31	2,89	2,48	2,07	1,65	1,24	0,83	0,41	0,00
-3	3,889	3,50	3,11	2,72	2,33	1,94	1,56	1,17	0,78	0,39	0,00
-4	3,513	3,16	2,81	2,46	2,11	1,76	1,41	1,05	0,70	0,35	0,00
-5	3,238	2,91	2,59	2,27	1,94	1,62	1,30	0,97	0,65	0,32	0,00
-6	2,984	2,69	2,39	2,09	1,79	1,49	1,19	0,90	0,60	0,30	0,00
-7	2,751	2,48	2,20	1,93	1,65	1,38	1,10	0,83	0,55	0,28	0,00
-8	2,537	2,28	2,03	1,78	1,52	1,27	1,01	0,76	0,51	0,25	0,00
-9	2,339	2,11	1,87	1,64	1,40	1,17	0,94	0,70	0,47	0,23	0,00
-10	2,156	1,94	1,72	1,51	1,29	1,08	0,86	0,65	0,43	0,22	0,00
-11	1,96	1,76	1,57	1,37	1,18	0,98	0,78	0,59	0,39	0,20	0,00
-12	1,8	1,62	1,44	1,26	1,08	0,90	0,72	0,54	0,36	0,18	0,00
-13	1,65	1,49	1,32	1,16	0,99	0,83	0,66	0,50	0,33	0,17	0,00
-14	1,51	1,36	1,21	1,06	0,91	0,76	0,60	0,45	0,30	0,15	0,00
-15	1,38	1,24	1,10	0,97	0,83	0,69	0,55	0,41	0,28	0,14	0,00
-16	1,27	1,14	1,02	0,89	0,76	0,64	0,51	0,38	0,25	0,13	0,00
-17	1,15	1,04	0,92	0,81	0,69	0,58	0,46	0,35	0,23	0,12	0,00
-18	1,05	0,95	0,84	0,74	0,63	0,53	0,42	0,32	0,21	0,11	0,00
-19	0,96	0,86	0,77	0,67	0,58	0,48	0,38	0,29	0,19	0,10	0,00
-20	0,88	0,79	0,70	0,62	0,53	0,44	0,35	0,26	0,18	0,09	0,00