

**2023-2024**

Master 1 Biologie Végétale

***PROJET SERRILIENCE - VERS UNE PRODUCTION  
SOUS SERRES PLUS RESILIENTES PAR UNE  
CONDUITE ECONOMIQUE EN CHAUFFAGE***

**ARTHUR ESNAULT**

09 février 2001

Sous la direction de Jean-Marc Celton

**STAGE REALISE A LA STATION EXPERIMENTALE DU  
CATE**

**DU 29 AVRIL 2024 AU 19 JUILLET 2024**

Maîtresse de stage : Glynis Bentoumi

**Jury**

Philippe Simier : président

Jean-Marc Celton : directeur

Anis Limami : membre

Soutenu publiquement le 03 juillet 2024



## **AVERTISSEMENT**

L'université n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les travaux des étudiant·es : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

## ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

*Engagement à signer et à joindre à tous les rapports, dossiers, mémoires ou thèse*

Je, soussigné Arthur Esnault

Déclare être pleinement conscient que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiée sur toutes formes de support, numérique ou papier, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire cette thèse / rapport / mémoire.

Signé par l'étudiant le 24 / 06 / 2024

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'A' followed by a horizontal line and a small flourish.

## REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier Glynis Bentoumi et Alain Guillou pour leur encadrement et leur aide tout au long du stage. Merci beaucoup pour votre disponibilité, le partage de vos connaissances et votre soutien. Merci à vous de m'avoir proposé ce stage qui m'a énormément plu et appris. Merci à Jean-Marc Celton d'avoir accepté de me suivre durant ce stage en tant que tuteur référent. Merci à Nathalie Gérard et à toute l'équipe des serres pour leur accueil et leurs conseils.

## GLOSSAIRE

**Zéro végétatif** : Aussi appelé "Température de basse" correspond à la températures minimale qu'une plante à besoin pour se développer.

**Photoassimilats** : Composé biologique formé par assimilation issue de réaction dépendante de l'énergie lumineuse tel que la photosynthèse formant principalement des sucres plus ou moins complexes, dans lesquels l'énergie est stockée. Ces assimilats sont très importants pour les plantes et notamment dans le cadre des interactions sources-puits.

**Condensation** : Phénomène physique dans lequel la vapeur d'eau à l'état gazeux se transforme en gouttelette d'eau liquide. Phénomène qui se manifeste notamment par la rencontre d'un air chaud pouvant contenir une quantité de vapeur d'eau avec un air ou une surface plus froide pouvant être moins saturé en vapeur d'eau. Ainsi l'air chaud se refroidit et devient saturé en vapeur d'eau et le surplus de vapeur d'eau ne pouvant plus être contenu sous forme gazeuse se transforme en gouttes d'eau liquide.

**Indice Brix** : Unité de mesure de la quantité de sucre dans une solution, pour lequel 1 degrés Brix équivaut à 1 gramme de saccharose pour 100 grammes de solution. Ainsi plus l'indice Brix est élevé plus la solution est sucrée.

## LISTE DES ABREVIATIONS

CATE : Comité d'action technique et économique

SERRILIENCE : Serres plus résiliente par un conduite économe en chauffage

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

MWh : Mégawatt-heure

TWh : Téra watt-heure

EqCO<sub>2</sub> : Equivalent CO<sub>2</sub>

CVETMO : Centre de Vulgarisation et d'Etude Technique Maraîchère de la région d'Orléans

APREL : Association Provençale de Recherche et d'Expérimentation Légumière

AOPn : Association d'Organisation de Producteur national

CERAFEL: Comité Économique Agricole Régional "Fruits et Légumes"

CASDAR : Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural

FDSEA : Fédération Départementale des Syndicats d'Exploitation Agricole

CETA : Centre d'Etudes Techniques Agricoles

IRFEL : Innovation et Recherche en Fruits et Légumes

T°24h : Température sur 24 heures

CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone

Rayonnement PAR : Rayonnement Photosynthétiquement Actif

J/m<sup>2</sup> : Joule par mètre carré

DH : Déficit Hydrique

HR : Humidité relative

# SOMMAIRE

Introduction .....	1
Matériels et méthodes .....	6
Système serre .....	6
Dispositif de culture .....	6
Chauffage .....	6
Ecran thermique .....	7
Ventilateur .....	7
Conduite économique .....	8
Mise en place de la culture .....	8
Choix variétale .....	9
Résultats .....	10
Utilisation du système de ventilation et des écrans thermiques .....	10
Consommation énergétique .....	11
Climat des serres .....	12
Caractéristiques agronomiques .....	12
Discussion .....	15
Conclusion .....	17
Bibliographie .....	18





# INTRODUCTION

## Contexte de la Production de Tomates en France

La tomate est le deuxième légume le plus consommé en France après la pomme de terre, avec une consommation moyenne de 13,8 kg par an de tomate dans un ménage français (Cavard-Vibert et Serrurier, 2022). Cependant, la concurrence avec d'autres pays européens et une augmentation des prix d'achat (Cavard-Vibert et Serrurier, 2022) ont engendré une diminution de la consommation des fruits et légumes. En conséquence, la consommation en France reste inférieure aux 400g quotidiens recommandés par l'OMS (INRA, 2007). Ce déficit de consommation, ainsi que la concurrence accrue, soulèvent des questions sur la capacité de la France à assurer une souveraineté alimentaire ainsi qu'à améliorer la santé publique.

Selon un rapport du CTIFL réalisé en 2021, la culture de tomates est réalisée principalement sous serre et représente 1129 ha de surfaces soit 89% de la surface des serres chauffées en France (Grisey, Brajeul et Oudin, 2022). L'ensemble de ces serres nécessite l'utilisation d'énergie pour les chauffer, dont 80% de l'énergie utilisée proviennent de gaz fossiles (Grisey, Brajeul et Oudin, 2022).

## Impact Environnemental et Économique

Depuis 2022 une hausse significative du prix de l'énergie se fait sentir en raison d'un contexte géopolitique tendu notamment par le conflit en Ukraine. Ces événements ont engendré une augmentation importante du prix du gaz, passant de 16 €/MWh jusqu'à une pointe à 300 €/MWh. De plus, à long terme, un pic de production de gaz naturel devrait être atteint pour 2030 (The Shift Project, 2022). D'autres alternatives aux gaz fossiles sont utilisées pour chauffer les serres, notamment l'usage de biomasse dans 12,2 % des serres, d'eau chaude provenant d'industries dans 6,8% des serres et de propane dans 1% des serres (Grisey, Brajeul et Oudin, 2022).

Cependant, toutes ces techniques de chauffage associées à la consommation électrique ont l'inconvénient de rejeter une grande quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'ensemble des productions en France consomme annuellement environ 3,8 TWh, ce qui équivaut à un rejet de 0,75 million de tonnes eqCO<sub>2</sub> soit 666 tonnes eqCO<sub>2</sub> par hectare de serre chauffée (Grisey, Brajeul et Oudin, 2022). Cette situation est paradoxale pour les agriculteurs car les cultures sont peu résistantes aux changements climatiques, mais elles contribuent le plus à l'émission de gaz à effet de serre, en effet le milieu agricole représente un quart des émissions nationales (The Shift Project, 2022).

## Projet SERRILIENCE

Dans ce contexte le projet SERRILIENCE a été mis en place, porté par la station expérimentale du CATE, accompagné de partenaires tels que CVETMO, Terre d'Essais, Invenio, APREL, AOPn Tomates et Concombre de France, AOPn Fraise de France, CERADEL et Agrithermic. Le projet est financé par le programme CASDAR du ministère de l'Agriculture et de la souveraineté alimentaire et par la région Bretagne.

La station expérimentale du CATE située à Saint-Pol de Léon dans le Finistère, est un syndicat professionnel qui regroupe les organisations professionnelles légumières et horticoles de Bretagne. Créée en 1960 par l'initiative de la chambre de l'agriculture, de la FDSEA et du CETA, la station est gouvernée par un conseil d'administration composé de producteurs. Le CATE propose des services de recherche appliquée au niveau régional et national divisé en quatre pôles : légumes de pleins champs, légumes sous abris, horticulture ornementale et champignons cultivés.

Au niveau, national le CATE est partenaire du CTIFL pour la recherche appliquée sur la culture légumière et est membre de l'IRFEL association national regroupant quinze stations expérimentales en fruits et légumes. Au niveau régional, la station est membre du phytopôle Bretagne, collaborant avec plus de 2 500 légumiers et horticulteurs. Elle est également importante pour la filière légume en Bretagne en travaillant avec de nombreux partenaires coordonnés par l'AOP CERADEL de Bretagne. Les résultats des expérimentations sont diffusés par le biais d'une revue trimestrielle intitulée "Aujourd'hui & Demain" pour bénéficier aux producteurs.

Les objectifs du projet SERRILIENCE sont d'adapter les systèmes de production de tomates, de concombres et de fraises sous serre chauffées afin de réaliser au moins 30% d'économie d'énergie thermique. Les solutions sont développées en collaboration avec les producteurs, dans un objectif d'adaptations à court terme, facile et rapide à mettre en place. Pour ce faire, deux aspects seront co-évalués par les stations expérimentales et les producteurs.

Dans un premier temps, l'évaluation d'équipements innovants permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des productions en minimisant le chauffage tout en maintenant le rendement agronomique et les conditions sanitaires.

Dans un second temps, l'évaluation de diverse variété pour identifier celles qui sont le mieux adapté à une conduite à basse énergie.

## Méthodes et Techniques de Chauffage des Serres

Depuis la fin des années 1970, le chauffage à était introduit dans la culture sous abri, permettant l'adoption de nouvelles techniques culturales telles que la culture hors-sol,

le greffage et la culture de variétés indéterminées. Le contrôle du climat sous serre est crucial pour la culture de tomates, qui est exigeante en températures avec un zéro végétatif\* estimé à 14°C. L'utilisation du chauffage en serre permet un gain sur les rendements et la précocité des cultures, tout en réduisant la pression des maladies fongiques et facilité la lutte biologique. Les températures optimales pour la culture de tomates sous serre sont de 19 à 25 °C le jour et 15 à 18°C la nuit. Cependant, c'est surtout la T°24h qui est importante à maintenir et à ajuster au cours de la culture pour assurer un bon équilibre entre vigueur et générativité. La T°24h de base pour les tomates est de 17,5 °C (Turcotte et al, 2017).

Cependant, l'impact de la température sur la culture varie selon d'autres facteurs, notamment le rayonnement global, le taux d'humidité et le taux de CO<sub>2</sub>. Certains facteurs liés à la variété ou au stade de développement de la plante influencent également sur la température optimale dans la serre (Turcotte et al, 2017). La serriculture permet de pouvoir gérer la plupart des paramètres qui influent sur le climat, pour autant, sauf utilisation d'un éclairage d'appoint en hiver, seul le rayonnement n'est pas contrôlé. C'est principalement la lumière qui va influencer le paramétrage des serres pour augmenter ou limiter l'influence des autres paramètres dans le but d'avoir un environnement optimal pour maximiser le rendement et les gains de précocité.

Le rayonnement lumineux est divisé en un rayonnement thermique sous forme d'infrarouge (50%) qui va chauffer la serre et un rayonnement PAR (45%) dont une partie sera absorbée par les plantes pour réaliser la photosynthèse (Turcotte et al, 2017).

## **Techniques de Gestion de l'Humidité et de la Température**

Le chauffage des serres a pour but principal d'assurer des températures optimales pour avoir une culture qui a un bon équilibre vigueur/générativité en assurant une migration adéquate des photoassimilats\* vers les organes végétatifs et reproducteur (Turcotte et al, 2017). Pour assurer cet équilibre, les températures varient selon plusieurs périodes : préjour (un peu avant et après le lever du soleil), jour, forçage thermique (avant midi jusqu'en début d'après-midi), prénuite (un peu avant et après le coucher du soleil). L'ensemble de ces périodes donne la T° 24H, cette température va être impactée par les variations de l'émission des rayonnements solaires.

La photosynthèse est essentielle pour le fonctionnement global de la plante par la formation d'énergie chimique, pour réaliser ce processus il est nécessaire que la plante dispose de CO<sub>2</sub>, d'eau et d'énergie lumineuse.

Le CO<sub>2</sub> est donc un facteur limitant pour la photosynthèse, il est absorbé par la plante au niveau des stomates depuis l'air atmosphérique de la serre. Néanmoins, cette

assimilation peut se faire lorsque les stomates sont ouverts lors du processus d'évapotranspiration, ainsi il est important de favoriser des conditions climatiques favorisant ce phénomène.

L'humidité de l'air est un facteur important pour réguler l'évapotranspiration des plantes, il est donc nécessaire de pouvoir évacuer l'eau contenue dans l'air pour le désaturer et favoriser l'évapotranspiration. La mesure de l'humidité est exprimée par le déficit hydrique (DH) qui prend en compte la température et l'humidité relative, cette mesure exprime la quantité de vapeur d'eau manquante pour que l'air soit saturé à 100% (Turcotte et al, 2017). Le DH est mesuré en g d'eau par m<sup>3</sup> d'air (g/m<sup>3</sup>), plus les valeurs sont faibles plus l'air est humide. Pour réguler l'humidité de l'air dans les serres, il est possible d'utiliser des ventilateurs ou d'aérer la serre par le biais des faîtages, cela permet de chasser de l'air humide pour le remplacer par de l'air extérieur sec (Turcotte et al, 2017). La ventilation des serres est exprimée selon un taux de renouvellement, les serres n'étant pas totalement étanches l'air est en partie renouvelé dans une serre même fermée, lors des ouvertures des serres le taux de renouvellement peut être de quelque % pour une légère ouverture à plus de 50% pour des grandes ouvertures (Turcotte et al, 2017). La ventilation doit être effectuée avec prudence pour notamment éviter le phénomène de ventilation froide, ce phénomène causé par des différences de températures trop important entre l'extérieur et l'intérieur entraîne une chute d'air froid au niveau des plantes ce qui provoque un arrêt de l'évapotranspiration et la fermeture des stomates, de plus cela entraîne des conditions favorables à la formation de maladies fongiques notamment par la formation de *Botrytis* par condensation\* (Turcotte et al, 2017).

## Innovation pour la déshumidification

D'autres méthodes de déshumidification ont été mises en place avec notamment l'échangeur double flux. Ce déshumidificateur a pour principe de condenser l'humidité de l'air chaud par croisement avec un air extérieur froid et sec au sein d'un tube composé d'alvéoles. Il va y avoir un transfert d'énergie depuis l'air chauds et humide vers l'air froid et sec, alors cet air froid et sec va se réchauffer et être distribué dans la serre par des ventilateurs disposés sous les gouttières (Guillou, 2012; Bodiou, 2013). Ce type de déshumidificateur a permis de réaliser des économies d'énergie comparé à des déshumidificateur thermodynamique classique, notamment par le biais d'une structure permettant un transfert passif ne nécessitant pas un compresseur pour assurer le transfert énergétique, la vitesse des ventilateurs va également s'adapter à l'humidité pour consommer moins d'énergie. L'économie d'énergie réalisée avec un échangeur double flux est de 65% par rapport à un déshumidificateur thermodynamique et il peut être utilisé sur des périodes plus longues (Guillou, 2012;

Bodiou, 2013), cela permet une utilisation plus longue d'un autre outil pour réaliser des économies d'énergie qui est l'écran thermique.

L'écran thermique peut être fixe ou mobile et simple ou double avec un écran d'ombrage associé, les écrans thermiques permettent de réduire le volume de serre à chauffer, mais entraîne une réduction de la quantité de lumière transmise dans la serre par la couverture de la toile et par la condensation se créant à leurs surfaces, de plus cet écran entraîne une augmentation de températures dans les serres associée à une augmentation de l'humidité. En effet, comme ces écrans sont peu perméables à l'eau et sont situés sous le toit des serres où se trouvent les ouvrants permettant la ventilation, la déshumidification de l'air est limitée. Les écrans thermiques sont donc utilisés lors des périodes de nuit et de pré-jour selon le climat dans la serre (Grisey et Brajeul, 2013; Grisey, Brajeul et Oudin, 2022).

Le projet SERRILIENCE a pour but de réaliser des économies d'énergie supplémentaire par une utilisation prolongée des écrans thermique par le biais de ventilateurs innovant qui vont assurer un échange entre l'air de la serre et l'air extérieur sec dans le but d'assurer une déshumidification de l'air lorsque les écrans sont déployés. En complément d'autres ventilateurs sont assurés le brassage de cet air sec dans la serre pour limiter les écarts de température importants dans la serre. Ainsi, le dispositif va être testé entre une serre équipée des ventilateurs et des écrans et une serre avec les écrans mais, sans ventilateurs, l'objectif est d'observer si des économies significatives d'énergie ont été réalisées sans impacter le rendement agronomique, mais également de déterminer des variétés adaptées à cette conduite de basse énergie.



# MATERIELS ET METHODES

## SYSTEME SERRE

L'expérimentation se base sur la comparaison de 2 chapelles de 786 m<sup>2</sup> disposées sur la partie sud du réseau de serres. Chacune des chapelles fait 7 m de haut avec des travées de 4,5 m, elle partage un corridor climatique de 1.20 m de large dans lequel le CO<sub>2</sub> est incorporé dans l'air. Ce CO<sub>2</sub> provient de l'activité de la chaudière ou par des injections de CO<sub>2</sub> liquide. Les 2 serres sont différenciées par le système de ventilation, ainsi la serre test dispose d'ouvrant guillotine sur la paroi externe de la chapelle permettant de faire entraîner de l'air extérieur, cet air sera brassé par des ventilateurs au sein de la serre. La serre munie de ventilateurs test pas d'ouvrant guillotine.

## Dispositif de culture

La culture des plants de tomates est réalisée en hydroponie de façon similaire dans les 2 serres. Chaque compartiment dispose de 11 gouttières de 30 cm espacées entre elles de 1.80 m, sur lequel sont disposés des pains de laine de roche accueillant les plants de tomates. Une irrigation en cycle fermé alimenté par l'eau de pluie est mise en place pour garantir une croissance optimale des plantes. L'arrosage s'effectue par micro-goutteurs de façon brève et espacée dans le temps variant selon le climat de la serre. L'eau est absorbée en partie par les plantes, tandis qu'une quantité d'eau est drainée, cette eau circule dans les gouttières pour être ensuite recyclée et utilisée dans le système. Un relevé de la quantité d'arrosage est réalisé tous les jours, ainsi que des mesures du pH et de la conductivité électrique (EC) sur les relevés d'arrosage et de drainage sont effectués régulièrement dans la semaine afin de s'assurer du bon fonctionnement du système. Les parcelles situées en bordure des gouttières ne rentrent pas en compte dans l'expérimentation, mais vont présenter des plants de tomates afin de réduire l'impact de certains paramètres et notamment le rayonnement lumineux sur l'ensemble des gouttières. Afin d'assurer la pollinisation des plants de tomates une ruche de bourdon est installée dans chacune des serres, l'activité des bourdons est contrôlée toutes les 48 h, par une observation du marquage naturelle effectué ou non sur les pistils des fleurs de tomates.

## Chauffage

Le chauffage des serres se fait par une chaudière à gaz qui par son activité produit du CO<sub>2</sub> qui sera réutilisé pour être injecté dans les serres. La chaleur produite va permettre de chauffer de l'eau qui sera stockée dans une cuve. L'eau chauffée va circuler dans des tubes de différentes façons dans la serre, soit dans des rails qui sont situés au





niveau du sol de la serre entre les gouttières, ou alors à travers des tubes de végétation également appelés forcas. Ils sont situés au-dessus des gouttières au niveau de la plante, les tubes sont au nombre de 2. La proximité de ces tubes permet un réchauffement rapide de la culture pour éviter les problèmes liés à la condensation.

## **Ecran Thermique**

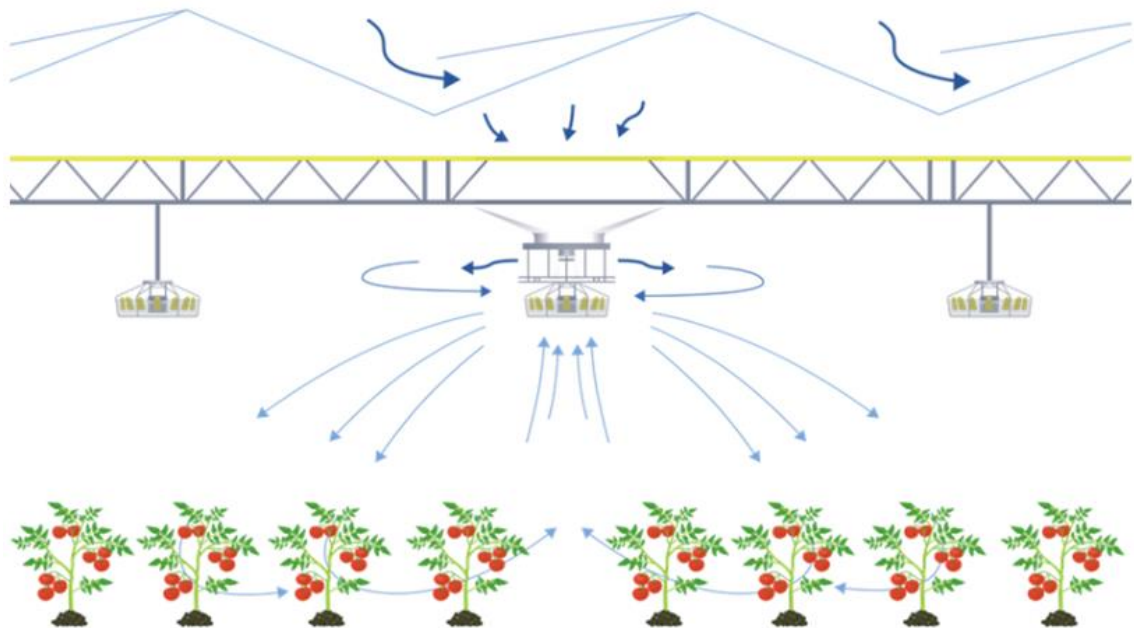
Un écran thermique est utilisé dans les 2 serres, ces écrans sont des toiles isolantes qui permettent de réduire le volume de serre à chauffer tout en conservant la chaleur déjà présente dans la serre. L'écran thermique utilisé est un écran mobile, ce qui permet de le déployer la nuit quand les températures extérieures sont plus froides, pour conserver la chaleur de la serre. Les écrans s'ouvrent la journée pour mieux laisser passer le rayonnement lumineux et permettre de déshumidifier la serre.

L'ouverture et la fermeture des écrans thermiques sont automatisées selon un seuil de différents facteurs tel que le rayonnement lumineux ou la chaleur. La toile utilisée dans les 2 serres est le Luxous 1147 FR de chez Ludvig Svensson, il est fabriqué en polyester et est transparent, mais est imperméable à l'eau ce qui ne permet pas de ventiler la serre lorsque l'écran est déployé. Cet écran bloque 11% du rayonnement lumineux et permet une économie théorique d'énergie de 47% en fonctionnement constant.

Lors de forte chaleur un écran d'ombrage est utilisé pour limiter une augmentation de chaleur trop importante. L'écran utilisé est le Harmony 2315 O FR, qui est un écran transparent et qui est perméable ce qui permet une évacuation de l'humidité. Cet écran peut être également utilisé la nuit en complément du Luxous 1147 FR pour une économie d'énergie supplémentaire.

## **Ventilateurs**

Deux types de ventilateurs sont présents dans la serre économique (Annexe I). Deux ventilateurs verticaux nommés Ventilation Jet, ces ventilateurs permettent d'admettre de l'air sec présent au-dessus des écrans vers l'intérieur de la serre pour déshumidifier la culture (Figure 1). Les ventilateurs fonctionnent uniquement lors du déploiement des écrans en deuxième partie de nuit (5 heures après le coucher de la nuit) pour une déshumidification optimale, le fonctionnement se fait en continu jusqu'au lever du soleil. La vitesse du ventilateur varie selon 2 périodes, une 1ère période de 5h après le coucher du soleil jusqu'à la phase de relance, la vitesse de rotation est réglée entre 40% et 70% de sa capacité selon une consigne d'hygrométrie induisant l'arrêt des ventilateurs si  $HR > 82\%$ . Sa capacité de traitements est de 5500 m<sup>3</sup>/h pour une puissance de 390 W.



**Figure 1** : Dispositif de ventilation en conduite économique. Les flèches bleu foncé représentent la ventilation Jet, les flèches bleu clair représentent la ventilation ClimaFlow. (Source : Ludvig Svensson)

Six ventilateurs verticaux sont également présents dans la serre, ils sont nommés ClimaFlow. Leur rôle est de brasser l'air sec qui a été admis par les ventilateurs Jet, mais également de créer un mouvement d'air favorable au développement de la culture (Figure I). Les ventilateurs peuvent fonctionner pendant 24H, mais ils sont programmés pour s'arrêter si la température est supérieure à 24°C le jour ou 17°C la nuit, ils s'arrêtent également si l'hygrométrie est supérieure 80% d'humidité relative et peuvent aussi s'arrêter si la position des ouvrants est supérieure à 20%. La vitesse de ces ventilateurs est réglée à 30% la nuit, 50% en phase de relance et 40% le jour.

## Conduite économique

L'utilisation de ce système de ventilation en complément d'un écran thermique permet d'adapter le système à une conduite économique. La programmation au sein de la serre permet d'utiliser l'écran thermique sur une période plus longue de 1h30 avant le coucher du soleil jusqu'à 2h après le lever du soleil, au lieu de 1h après le lever du soleil. Cette utilisation prolongée des écrans thermique le matin permet de ne pas utiliser le chauffage au sol des rails et d'utiliser qu'un seul des 2 forcas de fin mai à septembre, dans la serre témoins les rails sont chauffés à 40°C jusqu'à fin mai et les doubles forcas sont maintenus toute la saison. Les écrans thermiques peuvent également se déployer quand la température descend en dessous de 11°C à 13°C la nuit au lieu 9°C à 11°C dans la serre témoin, cela permet à l'écran d'être beaucoup plus réactifs. Le système de ventilation permet de garder l'écran fermé pendant toute la durée d'utilisation, alors que dans la serre témoin, on peut observer un entrebâillement de l'écran correspondant à 15% d'ouverture de l'écran lorsque l'hygrométrie est trop importante.

## Mise en place de la culture

Différentes variétés de tomates vont être testées, mais vont suivre un procédé de culture semblable. Tout d'abord, il va y avoir une étape de semis de porte-greffe et de variétés provenant de différents semenciers, ces semis ont été réalisés le 6 et le 7 novembre 2023, après 2 à 3 semaines les variétés sont greffées sur le porte-greffe. Un repiquage s'effectue à la 4<sup>ème</sup> semaine de culture, sur des pains de laines de roche GRODAN Grotop Master de 90 cm de largeur, 115 cm de longueur et 10 cm de hauteur. Les plantes une fois bien enracinées dans le substrat sont amenées en serre le 2 janvier 2024, les plants sont espacés les uns des autres sur les gouttières d'une telle façon qu'ils ne se chevauchent pas, car cela peut entraîner une compétition pour la lumière provoquant un allongement des tiges associée à une perte de vigueur. La récolte a commencé à partir du 2 avril 2024.

## Choix Variétale

Les variétés de tomates étudiées sont toutes des variétés en grappes greffées sur le porte-greffe Equifort de chez De Ruiter. Certaines variétés sont présentes dans la serre en conduite économique et en conduite témoin, et certaines variétés sont uniquement étudiées en conduite économique.

Les variétés présentes dans les 2 serres sont la variété Xaverius de chez Axia seed, les variétés Sunvine et Ronvine de chez Numhens, et la variété Rhodium de chez Enza Zaden. Xaverius est une variété de référence avec une forte valeur agronomique en conduite standard. Chacune des variétés est présente sur 3 parcelles contenant 18 plants dans chacune des serres, ce qui équivaut 54 plants par variété dans une serre et 108 plants par variété au total dans les 2 serres (Annexe II).

Les variétés présentent uniquement en conduite économique sont la variété Climundo de chez Syngenta, la variété Xaveruis XR de chez Axia Seed, la variété Fendicia de chez Rijk Zwaan et la variété DRTH0055 de chez De Ruiter. Ces variétés sont présentes uniquement dans la serre en conduite économique, chaque variété est présente sur 2 parcelles contenant 14 plants, ce qui équivaut à 28 plants par variété (Annexe II).

La taille des grappes est effectuée sur 5 fruits en début de culture jusqu'en semaine 12, puis sur 6 fruits, mais uniquement pour les variétés Sunvine, Ronvine, Clumudo, DRTH0055 et Fendicia.

## RESULTATS

### Utilisation du système de ventilation et des écrans thermiques

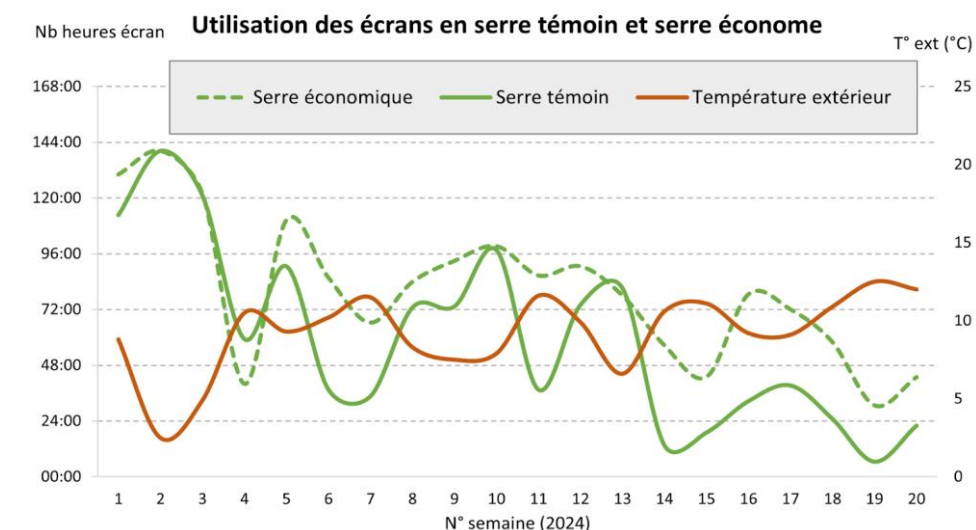
Pendant les quatre premières semaines de cultures, la ventilation Jet n'a pas été activée, alors que la ventilation ClimaFlow a été mise en route dès la semaine 1 (07/01/2024) mais a cessé de fonctionner à partir de la semaine 4 (23/01/2024). À partir de la semaine 4, les réglages de fermeture des écrans ont changé : les écrans se ferment la nuit lorsque la température descend en dessous de 13°C (au lieu de 11°C) dans la serre économique, et en dessous de 11°C (au lieu de 9°C) dans la serre témoin. À partir de la semaine 5, la ventilation Jet et ClimaFlow ont été réactivées, avec des pannes observées aux semaines 11 et 13. C'est à partir de la semaine 5 que le dispositif expérimental a fonctionné pleinement, montrant des différences entre les deux approches.

Durant les quatre premières semaines, les écrans des deux serres ont été déployés pendant environ 108 heures chacune (Tableau I, Figure 2). De la semaine 5 à la semaine 20, la serre économique a fermé ses écrans pendant 1514 heures contre 1087 heures pour la serre témoin, soit une différence de 427 heures (Tableau I), représentant une augmentation de 36% de la durée de fermeture dans la serre économique. La Figure II montre que, à l'exception de la semaine 13 due à une panne, la durée hebdomadaire de fermeture des écrans dans la serre économique a dépassé celle de la serre témoin depuis la semaine 4 et l'installation complète du système de ventilation. À partir de la semaine 14, la durée hebdomadaire de fermeture des deux écrans a diminué, en lien avec une augmentation de température autour de la semaine 13 (Figure 2). La température moyenne de la semaine 5 à 13 était de 9,2°C, comparée à 10,8°C de la semaine 14 à 20. Cette différence à partir de la semaine 13 semble également influencer les durées d'utilisation des écrans dans les deux serres (Figure 2). Entre la semaine 5 et 13, les écrans ont été fermés pendant 794 heures dans la serre économique et 599 heures dans la serre témoin, soit 195 heures de fermeture supplémentaire en serre économique, représentant une augmentation de 24% par rapport à la serre témoin.

De la semaine 14 à la semaine 20, l'écran a été fermé pendant 382 heures dans la serre économique et 157 heures de plus que dans la serre témoin. Un graphique basé sur les données de la ventilation Jet a été produit (Figure 3). Depuis sa mise en route à la semaine 4, la ventilation Jet a maintenu une constance avec des durées hebdomadaires comprises entre 70 et 50 heures jusqu'à la semaine 13 (Tableau I), avec une moyenne de 63 heures par semaine. Cependant, à partir de la semaine 12, ces durées ont commencé à diminuer pour atteindre une moyenne hebdomadaire de

Semaine	Serre 6 - économique		Serre 5 - Témoin	Température extérieure	Commentaire
	Nb heures ventilation Jet	Nb heure écran	Nb heure écran		
1	00 : 00	130 : 12	112 : 42	8,8	Mise en route <del>ClimaFlow</del>
2	00 : 00	140 : 21	140 : 21	2,5	
3	00 : 00	121 : 55	121 : 08	4,9	
4	00 : 00	40 : 04	59 : 17	10,5	Arrêt <del>ClimaFlow</del> + fermeture écran T<13°C S6 et T<11°C S5
5	70 : 55	110 : 32	90 : 37	9,3	Mise en route <del>VentilationJet</del> et <del>ClimaFlow</del>
6	69 : 25	85 : 48	37 : 32	10,2	
7	57 : 30	66 : 26	34 : 38	11,5	
8	63 : 35	83 : 59	72 : 53	8,3	
9	63 : 40	92 : 59	73 : 21	7,5	
10	68 : 15	99 : 20	97 : 37	7,9	
11	57 : 50	86 : 41	37 : 28	11,6	Panne 1 nuit
12	64 : 20	90 : 40	74 : 01	9,9	
13	53 : 00	78 : 04	81 : 12	6,6	Panne 1 nuit
14	42 : 45	56 : 36	13 : 25	10,6	
15	35 : 05	43 : 03	19 : 00	11,1	
16	52 : 30	78 : 37	32 : 33	9,2	
17	50 : 50	72 : 06	39 : 17	9,1	
18	40 : 55	58 : 01	24 : 52	10,9	
19	25 : 40	30 : 48	06 : 26	12,5	
20	30 : 50	42 : 56	21 : 58	12,0	
Total	847 : 05	1609 : 08	1190 : 18		

**Tableau I :** Tableau du nombre d'heures d'utilisation hebdomadaire de la ventilation Jet et des écrans thermique dans la serre économique et témoin selon la température extérieure



**Figure 2 :** Graphique du nombre d'heures de fermeture hebdomadaire des écrans en serre économique et témoin selon la température extérieure.

39 heures (Tableau I), les durées de ventilation suivent la tendance de la fermeture des écrans, car la ventilation est activée uniquement lorsque les écrans sont fermés. Pour la ventilation ClimaFlow, un autre graphique basé sur les données collectées a été réalisé (Annexe III). On observe que le ventilateur fonctionne de manière constante autour de 168 heures par semaine.

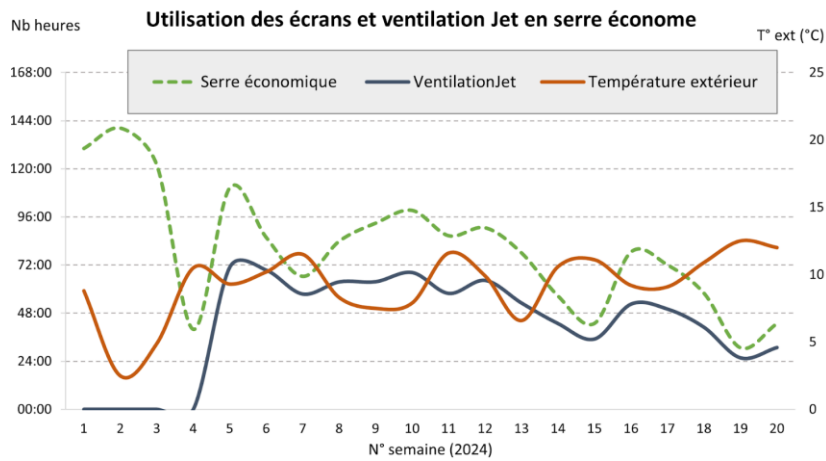
## Consommation énergétique

La consommation d'énergie dans la serre se divise en deux types : énergie thermique (propane) utilisée pour le chauffage via des rails ou des forcas, chacun ayant sa propre consommation, et de l'énergie électrique pour les ventilateurs Jet et ClimaFlow. Les données sont cumulées pour obtenir une consommation globale thermique ou électrique, en KWh/m<sup>2</sup>. Avant l'utilisation du système de ventilation, seul le chauffage par rails était utilisé, les forcas étant éteints pour éviter de surchauffer les Jeunes plants. Avec la mise en place de la ventilation, le chauffage s'effectue par les rails et les forcas, bien qu'un arrêt des rails soit noté en semaine 13.

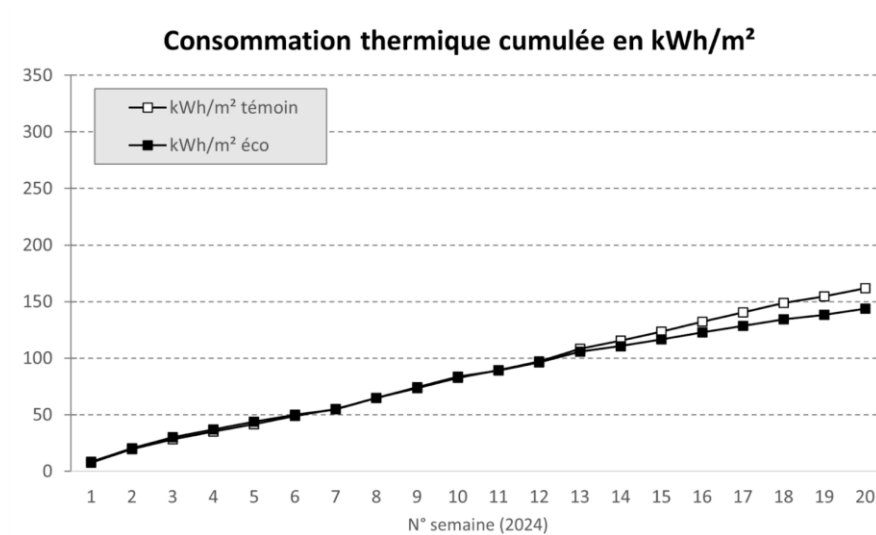
Tout au long de l'expérience, la consommation énergétique des deux serres reste similaire, que ce soit pour les forcas ou les rails, comme observés en semaine 12 avec 96,4 KWh/m<sup>2</sup> pour la serre économique et 97,1 KWh/m<sup>2</sup> pour la serre témoin (Annexe IV). L'écart de 0,7 KWh/m<sup>2</sup> entre les deux approches ne montre pas d'économie significative. À partir de la semaine 13, l'arrêt des rails dans la serre économique entraîne des différences croissantes dans les cumuls KWh/m<sup>2</sup> au fil des semaines (Figure 4). Sachant que le propane coûte 850 € par tonne et qu'une tonne équivaut à 13,5 MWh, le coût d'un MWh de propane est estimé à 63 €.

En prenant en compte la consommation jusqu'à la semaine 20, une économie de 11,1% est réalisée en serre économique, soit 18 KWh/m<sup>2</sup> d'économie ce qui équivaut à 1,14 €/m<sup>2</sup> d'économie.

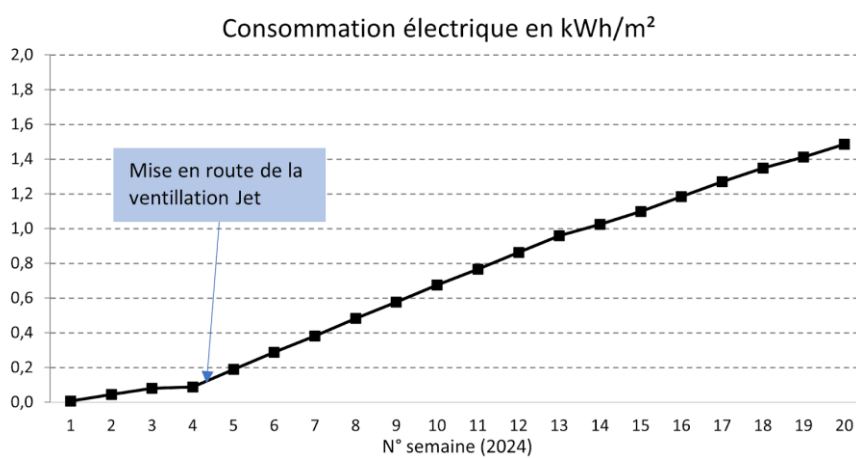
La serre économique consomme moins d'énergie thermique, mais nécessite plus d'électricité pour le système de ventilation. La consommation est plus élevée avec la ventilation Jet par rapport à ClimaFlow seul. On observe un faible cumul de kWh/m<sup>2</sup> avec ClimaFlow de la semaine 1 à 4, puis une nette augmentation à partir de la semaine 5 avec l'activation de la ventilation Jet (Figure 5). À la semaine 20, le cumul atteint 1,48 kWh/m<sup>2</sup>.



**Figure 3 :** Graphique du nombre d'heures de fermeture hebdomadaire des écrans en serre économe et du nombre d'heures d'utilisation hebdomadaire de la VentilationJet selon la température extérieure.



**Figure 4 :** Graphique de la consommation thermique cumulée (KWh/m²) entre la serre témoin et économe.



**Figure 5 :** Graphique du cumul de la consommation électrique (KWh/m²) du système de ventilation dans la serre économe.



## Climat des serres

Le climat extérieur et intérieur des deux serres a été mesuré, incluant la température extérieure, la luminosité, la température de jour, de nuit et sur 24 heures, ainsi que le CO<sub>2</sub> et l'humidité absolue. Les températures sur 24 heures, de jour et de nuit sont similaires entre les deux serres (Tableau II). Cependant, la concentration en CO<sub>2</sub> jour est inférieure en moyenne dans la serre économique par rapport à la serre témoin (Tableau II).

L'analyse des données disponibles est réduite et se concentre sur la période du 6 au 19 avril. Globalement, l'humidité absolue reste similaire entre les deux serres, bien que des écarts importants soient observés pendant les périodes de nuit. Ces écarts sont particulièrement marqués en début de nuit lorsque la ventilation Jet n'est pas encore active ; une fois en fonction, plusieurs heures sont nécessaires pour limiter les écarts d'humidité entre les deux serres. Les différences d'humidité varient selon les conditions, notamment lorsque les écrans sont déployés dans la serre témoin avec ou sans ventilation Jet, et que l'écran de la serre témoin est ouvert (Annexe V).

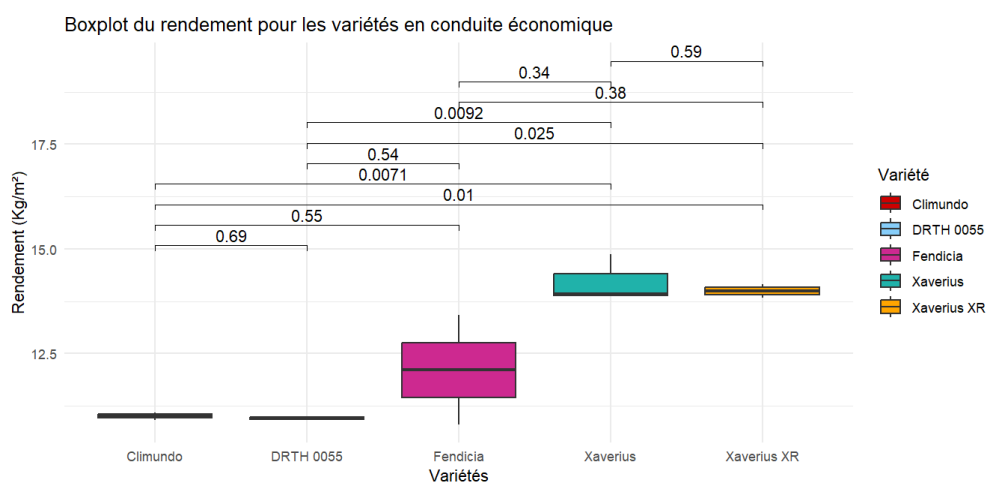
## Caractéristique agronomique

Depuis le début de la récolte, les différentes variétés de tomates grappes ont été analysées selon plusieurs paramètres. Toutes les variétés sont comparées avec une variété témoin, Xaverius, présente dans les deux types de conduite. Pour chaque récolte, le poids moyen des fruits et le nombre de grappes par mètre carré ont été mesurés, permettant ainsi de calculer le rendement en kg/m<sup>2</sup> (Annexe VI). Les résultats de ces mesures sont représentés par les récoltes cumulées au 30 mai, avec des boîtes à moustaches montrant les rendements provisoires des variétés selon le type de conduite. Un test de student à été appliqué aux données et représenté sur les boîtes à moustaches, sur lesquelles sont indiqués les valeurs de p-value qui équivaut aux différents échantillons.

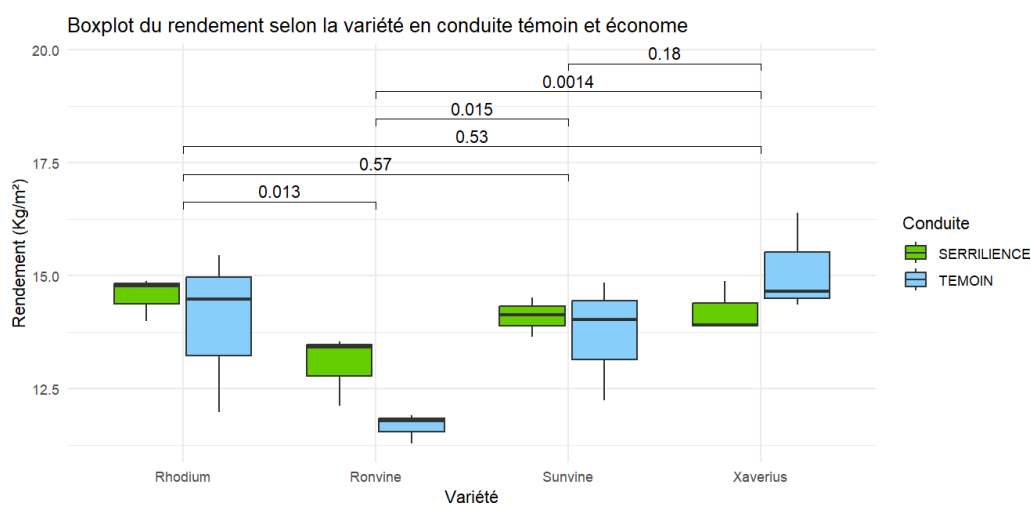
L'analyse des rendements montre que Xaverius XR est la variété en conduite économique dont le rendement se rapproche le plus de celui de la variété témoin, sans différence significative, par des p-value supérieur à 0,05 (Figure 6). Les variétés en conduite économique montrent des différences significatives uniquement avec Ronvine. Sunvine et Rhodium présentent des rendements proches de celui de la variété témoin, avec Rhodium montrant même un rendement supérieur et des écart-types moins importants que la variété témoin (Figure 7). Globalement, les écart-types sont moins importants en conduite économique qu'en conduite témoin, à l'exception de Ronvine et Fendicia (Figure 6, Figure 7).

Semaine (2024)	Lumière	Text	Tjour		Tnuit		T24h		CO2 jour	
			Témoin	Économe	Témoin	Économe	Témoin	Économe	Témoin	Économe
1	2041	8,8	20,2	20,2	18,3	18,5	19	19,1	1092	929
2	1720	2,5	19,4	19,5	17,5	17,5	18,2	18,2	926	714
3	3050	4,9	19,9	19,7	16,9	16,8	18	17,9	1172	1027
4	2960	10,5	20,2	20,2	16,9	17	18,2	18,2	1123	939
5	1983	9,3	19,8	19,7	16,4	16,2	17,8	17,6	859	748
6	2796	10,2	19	19	15,3	15,3	16,9	16,8	861	699
7	3635	11,5	19,7	19,6	15,6	15,5	17,3	17,2	855	632
8	3214	8,3	18,6	18,5	15,3	15,2	16,8	16,7	631	523
9	5075	7,5	19,3	19,3	15,4	15,3	17,2	17,1	858	632
10	6113	7,9	20,1	20,2	16,1	16	18	18	743	734
11	5424	11,6	20,4	20,3	16,4	16,5	18,4	18,4	800	836
12	5930	9,9	21,1	21	17	16,8	19,1	18,9	842	858
13	7512	6,6	20,7	20,4	16,6	16,3	18,8	18,5	766	808
14	7919	10,6	20,8	20,9	16,6	16,7	18,9	19	703	742
15	10968	11,1	21,7	21,7	16,6	16,5	19,5	19,4	627	642
16	12762	9,2	21,8	21,6	16,7	16,7	19,7	19,6	673	672
			20,2	20,1	16,5	16,4	18,2	18,2	846	758

**Tableau II** : Tableau du climat dans la serre témoin et économe, selon le climat extérieur (lumière et température extérieure).



**Figure 6** : Boxplot du rendement pour les variétés en conduite économe.



**Figure 7** : Boxplot du rendement selon la variété en conduite économe et témoin.

Une comparaison a été réalisée après deux semaines de conservation entre les grappes des différentes variétés testées et celles de la variété Xaverius, qui est la variété témoin. Les observations sur les fruits ont commencé en avril. Différents aspects des grappes ont été comparés : couleur de la partie végétative, brillance et forme des fruits, calibre et compacité des grappes, présence de points dorés et/ou de microfissures, fermeté moyenne et indice Brix\* des fruits. Des photos comparant les variétés et le témoin ont été prises (Annexe VII).

Pour la variété témoin Xaverius, les grappes présentent une partie végétative bien verte et épaisse, des fruits rouge clair et brillants, de forme haute et sillonnée, avec un calibre important et une bonne fermeté. Quelques microfissures et points dorés sont présents en avril, puis diminuent en mai, bonne fermeté.

La variété Sunvine a une partie végétative correcte mais moins épaisse et verte que Xaverius. Les grappes, d'abord composées de 5 fruits, passent à 6 en juin. Les fruits sont d'un rouge prononcé, brillants et de calibre variable. En avril, ils sont plus arrondis, puis deviennent plus aplatis en mai, avec peu de points dorés et une bonne fermeté.

Pour Fendicia, la partie végétative s'amincit et se décolore au fil des mois. Les grappes passent de 5 à 6 fruits en juin. Les fruits, initialement ronds et hauts, présentent des défauts de nouaison, ils sont cordiformes, orangés ternes et sans brillance. Des points dorés et des microfissures sont présents, mais la fermeté reste bonne.

Xaverius XR a une partie végétative verte et épaisse. Les grappes de 5 fruits présentent quelques défauts de nouaison précoces, avec des fruits d'un rouge prononcés et brillants, de calibre légèrement inférieur à Xaverius, avec quelques microfissures et points dorés, mais en moindre quantité. La fermeté est bonne.

DRTH 0055 possède une partie végétative épaisse mais décolorée et sèche. Les grappes, d'abord de 5 fruits, passent à 6 en juin. Les fruits sont rouges, brillants, de gros calibre, aplatis et sillonnés, avec de nombreuses microfissures et une bonne fermeté.

Climundo présente une partie végétative décolorée et peu développée en récolte précoce, puis assez épaisse dès mai. Les grappes, de 5 fruits, passent à 6 en juin. Les fruits sont orangés, ternes, avec très peu de brillance, de nombreuses microfissures et points dorés marqués. La fermeté est moyenne en début de saison, puis bonne dès mai.

Climundo présente une partie végétative décolorée et peu développée en récolte précoce, puis assez épaisse dès mai. Les grappes, de 5 fruits, passent à 6 en juin. Les fruits sont orangés, ternes, avec très peu de brillance, de nombreuses microfissures et

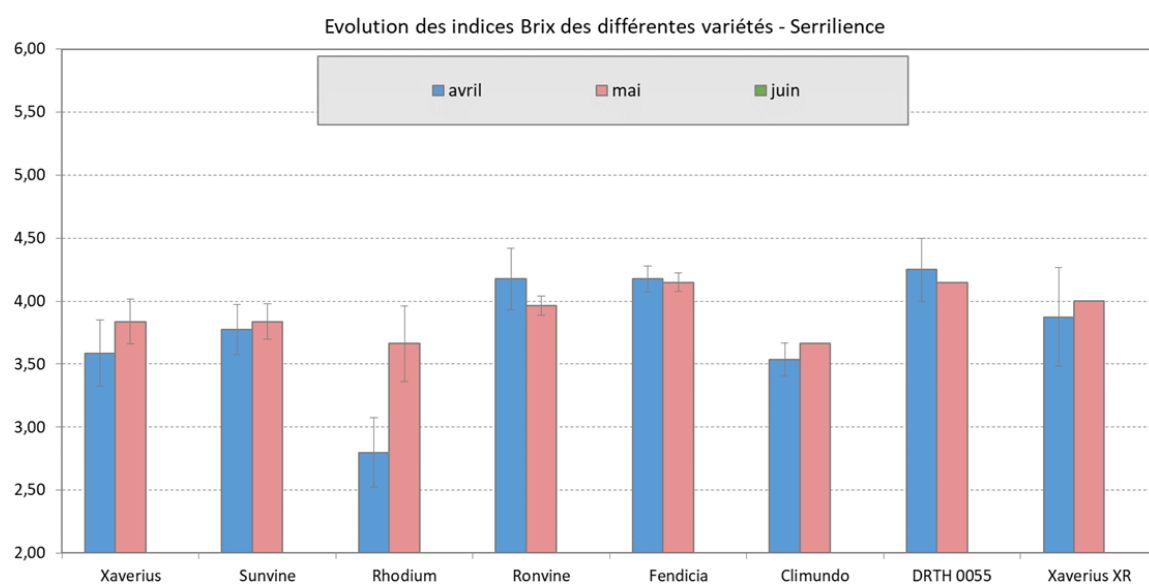


Climundo présente une partie végétative décolorée et peu développée en récolte précoce, puis assez épaisse dès mai. Les grappes, de 5 fruits, passent à 6 en juin. Les fruits sont orangés, ternes, avec très peu de brillance, de nombreuses microfissures et points dorés marqués. La fermeté est moyenne en début de saison, puis bonne dès mai.

Pour la variété Ronvine, la partie végétative est peu épaisse, décolorée et sèche. Les grappes comptent d'abord 5 fruits, puis 6 en juin, avec des fruits de gros calibre homogène, rouges clairs et très brillants. Des points dorés sont présents en avril, et uniquement des microfissures en juin. La fermeté est bonne.

Pour la variété Rhodium, les parties végétatives sont bien vertes, avec des épaisseurs variables, plus importantes pour les fruits de gros calibre. Les grappes ont 5 fruits, légèrement moins compactes, de calibre variable, rouges clairs et très brillants. Des points dorés prononcés en période précoce. La fermeté est bonne.

Les indices Brix, mesurant le taux de sucre des fruits, ont été réalisés sur 8 fruits et sont représentés sur la Figure 8 selon les mois. Les variétés Xaverius, Sunvine, Rhodium, Climundo et Xaverius XR montrent une augmentation des indices Brix entre avril et mai, avec une hausse pour Rhodium. Pour Ronvine, Fendicia et DRT 0055, les indices Brix diminuent avec le temps. Rhodium et Fendicia ont des indices Brix inférieurs à Xaverius. Fendicia se distingue par une faible variation entre avril et mai, avec des écart-types faibles, ce qui la rend homogène en termes de teneur en sucre dans le temps.



**Figure 8** : Evolution des Indices Brix des variétés dans la serre économique dans le temps

## DISCUSSION

Il faut noter que les données traitées dans ce rapport ne représentent qu'une partie de l'expérimentation complète. La culture prendra fin en novembre 2024, ainsi il reste encore plusieurs mois d'acquisition des données. L'utilisation prolongée des écrans grâce au système de déshumidification a permis des économies de chauffage tout en maintenant des températures similaires dans la serre. Les économies liées au système de ventilation sont notables à partir de la semaine 12 (mi-mars), en coupant le chauffage au sol. Cette période montre une différence significative dans la consommation d'énergie thermique entre les deux serres. Il pourrait être intéressant de n'utiliser le système de ventilation qu'à partir de cette période pour réduire la consommation électrique et améliorer la photosynthèse des plantes en début de culture. En termes d'économie réalisée, avec les données de l'année précédente et les premiers résultats de cette année, on peut estimer des économies thermiques de 20% qui équivaut à 70 KWh/m<sup>2</sup> pour diminuer les coûts de 4€/m<sup>2</sup>/an, pour la consommation électrique, on peut estimer une consommation de 2 KWh/m<sup>2</sup> qui équivaut à 0,4 €/m<sup>2</sup>/an. L'économie réalisée est donc d'environ 3,6 €/m<sup>2</sup>/an, ce qui est intéressant avec ce système c'est la consommation réduite d'électricité comparer à d'autre système de déshumidification, avec une consommation électrique de 15 KWh/m<sup>2</sup> pour la déshumidification thermique (Guillou, 2008-2009-2010-2011) et de 5 KWh/m<sup>2</sup> pour la déshumidification double flux (Guillou, 2012; Bodiou, 2013). Il serait également intéressant d'améliorer le système en utilisant des écrans plus thermiques avec lesquelles il serait possible d'avoir plus de 70% d'économies thermique contre 40% pour l'écran utilisée dans l'essai (Ogunlowo QO et al, 2024), cet écran fera l'objet d'un prochain essai au CATE en 2025-2026.

Du point de vue climatique, les températures de nuit et de jour sont similaires, indiquant que les consignes de chauffage et de déploiement des écrans sont optimales pour une conduite basse énergie. Cependant, une diminution de la concentration en CO<sub>2</sub> a été observée dans la serre économique, ce qui pourrait affecter l'efficacité de la photosynthèse et les rendements. Il pourrait être nécessaire d'injecter du CO<sub>2</sub> supplémentaire, ce qui poserait un problème de coûts dans un contexte de conduite économique.

En ce qui concerne l'humidité, des données supplémentaires sont nécessaires, mais il a été observé que l'humidité dans la serre économique est proche de celle de la serre témoin pendant la nuit grâce à la déshumidification par ventilation, ce qui est essentiel pour éviter la condensation et la formation de *Botrytis*.

Pour les variétés testées, Xaverius XR, Sunvine et Rhodium ont des rendements en conduite économique proches de Xaverius en conduite témoin, avec Rhodium ayant un rendement supérieur. Ces trois variétés présentent des écart-types réduits, ce qui

facilite le conditionnement et le transport, facilitant la commercialisation. Après deux semaines de conservation, les fruits de Rhodium et Xaverius XR ne montrent pas de défauts majeurs, bien que Xaverius XR présente quelques microfissures. Sunvine a une bonne conservation, mais avec des parties vertes plus décolorées.

En termes d'indices Brix, Xaverius XR et Sunvine sont proches de Xaverius, tandis que Rhodium a des indices Brix très bas en avril, fluctuants en mai, probablement en raison des conditions climatiques influençant la migration des photoassimilats.



## CONCLUSION

Le système de ventilation Jet permet de réguler l'hygrométrie au sein des serres en étant couplé à l'utilisation d'un écran thermique. Ce système a permis d'utiliser les écrans thermiques sur des périodes plus longues, réalisant ainsi des économies de chauffage par rapport à une utilisation limitée de l'écran thermique dans une serre témoin. Les conditions de température ont pu être maintenues de façon similaire dans les deux serres, malgré une utilisation moindre de chauffage dans la serre économique, ce qui démontre le bon calibrage et l'efficacité du système. La faible consommation en énergie électrique de la ventilation Jet, par rapport à d'autres dispositifs d'économie d'énergie, rend le système particulièrement intéressant.

L'évaluation des variétés a mis en avant trois variétés prometteuses : Xaverius XR, Rhodium et Sunvine. Leurs rendements se rapprochent de la variété témoin Xaverius en conduite témoin. Xaverius XR présente un bon niveau de production, mais des rendements et des formes irrégulières entre les plants. Sunvine, malgré un rendement légèrement moindre, peut également être intéressant, mais présente quelques défauts en conservation. Rhodium offre des rendements très intéressants, mais présente des problèmes importants concernant la teneur en sucre dans le fruit.

Pour finir, des essais complémentaires doivent encore être menés pour confirmer l'intérêt du système de ventilation et le comportement des variétés testées.

## BIBLIOGRAPHIE

BODIOU D. (2013). Déshumidification par échange thermique : des résultats positifs, Culture légumière hors-série, septembre 2013

CAVARD-VIBERT P. et SERRURIER M. (2022). *La consommation de la tomate Non définie*. <https://www.ctifl.fr/la-consommation-de-la-tomate> . Consulté le 21 mai 2024.

GRISEY A., BRAJEUL E. et OUDIN T. (2022). Enquête 2021 auprès des producteurs de tomate et de concombre sous serre sur l'utilisation de l'énergie : quelles sont les évolutions du parc de serres et des équipements de chauffage en France depuis 2016 ? Infos CTIFL (385), p 35–39.

The Shift Project (2022). Climat, crises : le plan de transformation de l'économie française. Editions Odile Jacob. 256p.

GRISEY A., BRAJEUL E. (2013). L'énergie chez les serristes en tomate et concombre : évolutions du parc de serre et des équipements de chauffage. Infos CTIFL (289), p.35-40

GUILLOU A. (2012). Tomate hors-sol : déshumidifier et économiser de l'énergie par un échange thermique double flux. Aujourd'hui et Demain (112), p. 21-23

GUILLOU A. (2011). De nouveaux équipements pour économiser l'énergie. Aujourd'hui et Demain (107), p. 6-7

GUILLOU A. (2008) Culture sous serre : réduire la facture énergétique, installations et premiers résultats à la station expérimentale du CATE. Aujourd'hui et Demain (95), p.3-9

GUILLOU A. (2008) Économie d'énergie : Intérêt du déshumidificateur, résultats de la première année d'essais à la station expérimentale du CATE. Aujourd'hui et Demain (97), p.8-15

GUILLOU A. (2009) Déshumidifier pour consommer moins d'énergie et maintenir le niveau des performances. Aujourd'hui et Demain (100), p.23-26

GUILLOU A. (2010) Réduire la facture énergétique en tomate hors-sol, la déshumidification : derniers résultats et perspectives. *Aujourd'hui et Demain* (102), p.19-22

INRA (expertise collective) (2007). Les fruits et légumes dans l'alimentation : enjeux et déterminants de la consommation. 4p. Disponible sur <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/inra-fruits-legumes-4pages-6nov.pdf>

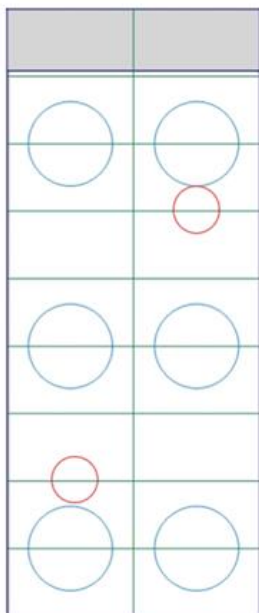
Ogunlowo QO, Akpenpun TD, Na WH, Adesanya MA, Rabiou A, Dutta P, Kim HT, Lee HW (2024) « Energy- and Yield-Based Performance Evaluation of a Phase Change Material–Integrated Single-Span Double-Layered with a Thermal Screen Greenhouse ». *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 50, mai 2024, p. 102499, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102499>.

TURCOTTE G., LAROUCHE R., CARRIER A., et LAMBERT L. (2017). « PRODUCTION DE LA TOMATE DE SERRE AU QUÉBEC (GUIDE TECHNIQUE) | Légumes de serre – Agri Réseau| Documents». *AgriRéseau*, <https://www.agrireseau.net/Legumesdeserre/documents/95590/production-de-la-tomate-de-serre-au-quebec-guide-technique> . Consulté le 21 mai 2024.

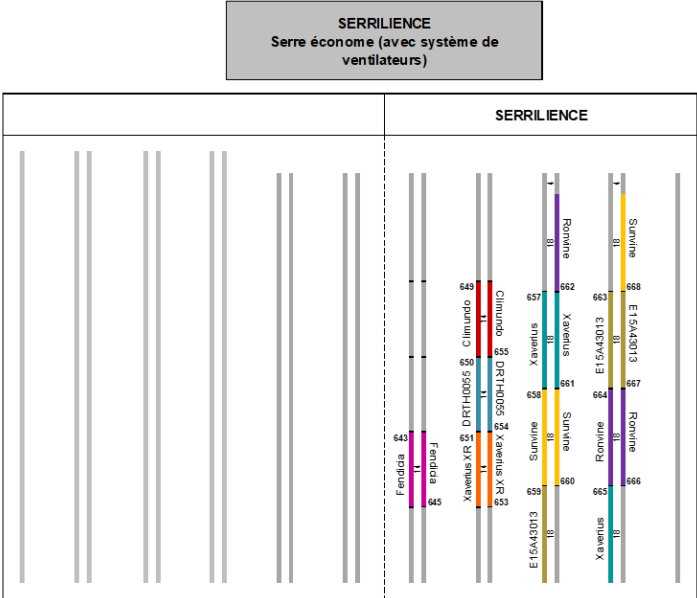
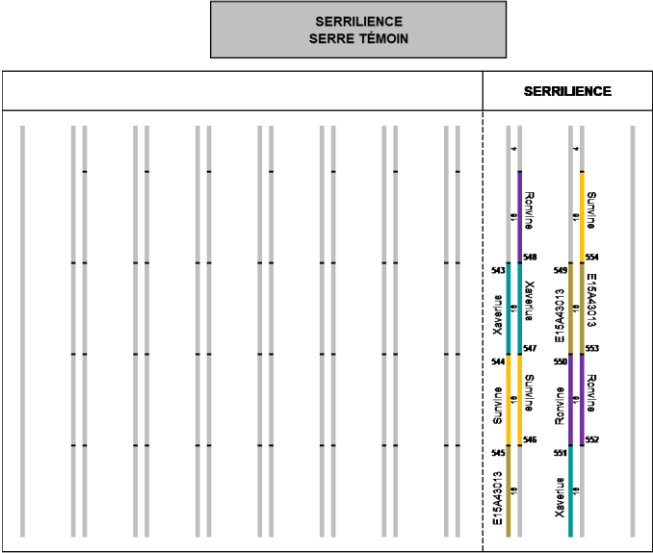
VIJAYAKUMAR A. et BEENA R. (2020). *Chemical Science Review and Letters Impact of Temperature Difference on the Physicochemical Properties and Yield of Tomato: A Review*. décembre 2020, <https://doi.org/10.37273/chesci.CS205107159>.

## ANNEXES

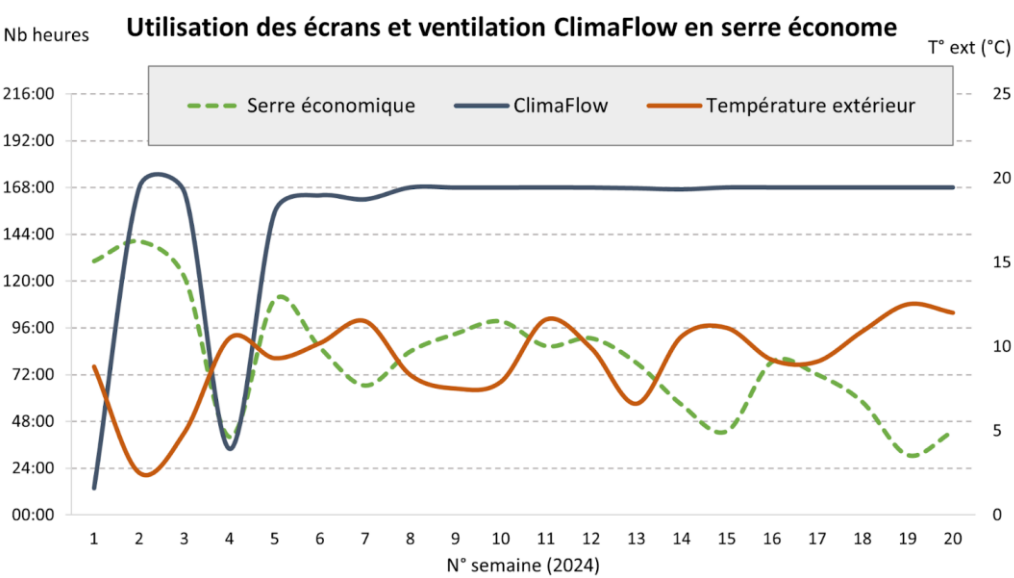
**Annexe I** : Plan de disposition des ventilateurs dans la serre économique (Gauche) et photo de dispositif de ventilation avec au premier plan Ventilation Jet et au second plan ClimaFlow (Droite). (Source : Ludvig Svensson)



**Annexe II** : Dispositif de culture pour le projet SERRILIENCE. Les couleurs délimitent les parcelles selon la variété présente, un numéro est attribué à chacune des parcelles, de 543 à 552 dans la serre témoin et de 643 à 668 dans la serre économique. Les chiffres entre les parcelles correspondent aux nombres de plants présents dans une parcelle. La variété E15A43013 correspond à la variété Rhodium.



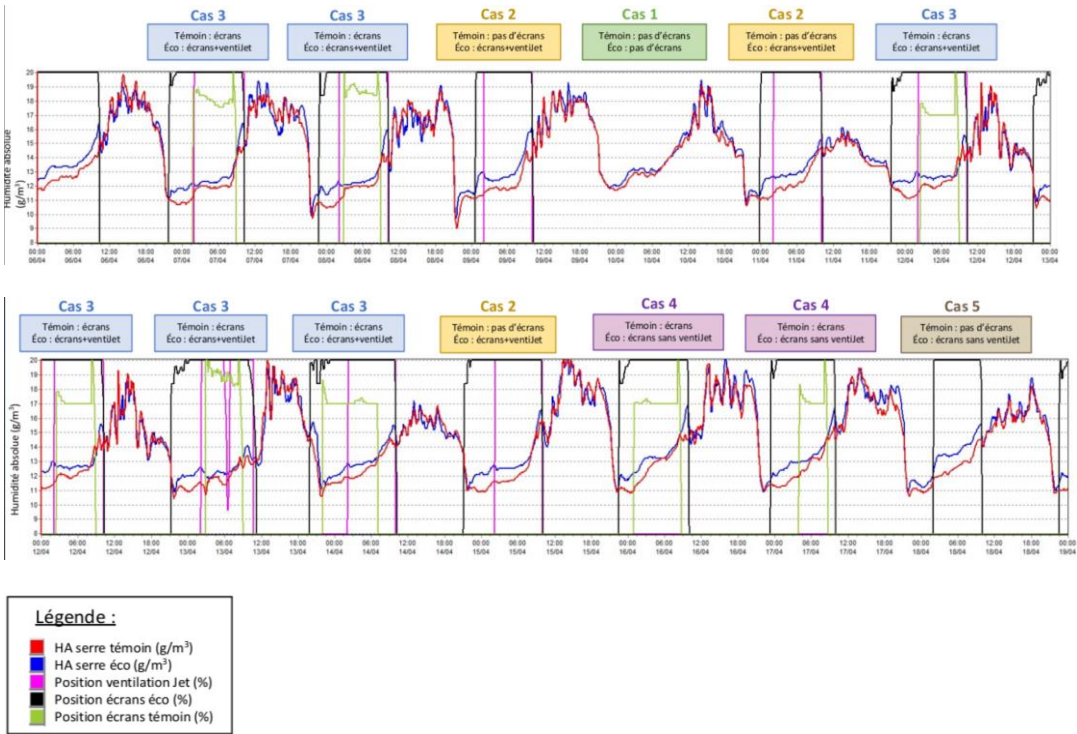
**Annexe III** : Données sur la consommation thermique entre la serre témoin et la serre économique.



**Annexe IV** : Données sur la consommation thermique entre la serre témoin et la serre économique.

Semaine	SV5 Témoin					SV6 Éco (avec Ventilation Jet)							
	Rail	Forcas	Aéros	MWh semaine	Cumul kWh/m²	Rail	Forcas	AVS	MWh semaine	Cumul kWh/m²			
1	5933	114		6,0	7,8	6473	4		6,5	8,3	Rail uniquement dans les 2 serres		
2	9086	6		9,1	19,5	9313	4		9,3	20,3			
3	6929	14		6,9	28,4	7634	10		7,6	30,1			
4	5219	20		5,2	35,1	5428	8		5,4	37,1			
5	1644	3480		5,1	41,7	1565	3575		5,1	43,7			
6	1242	4431		5,7	49,0	701	4119		4,8	49,9			
7	832	3912		4,7	55,1	118	3682		3,8	54,8			
8	2067	5407		7,5	64,7	2180	5536		7,7	64,7			
9	1624	5233		6,9	73,5	2155	5297		7,5	74,3			
10	1567	5340		6,9	82,4	2117	5206		7,3	83,7			
11	998	4525		5,5	89,5	186	3981		4,2	89,1	Arrêt rails SV6		
12	1207	4748		6,0	97,1	1019	4702		5,7	96,4			
13	2257	6476		8,7	108,4	25	7085		7,1	105,6			
14	1407	4044		5,5	115,4	3	3927		3,9	110,6			
15	1757	4560		6,3	123,5	5	4686		4,7	116,6			
16	1837	4919		6,8	132,2	0	4826		4,8	122,8			
17	1719	4693		6,4	140,4	0	4558		4,6	128,7			
18	1628	4773		6,4	148,6	1	4345		4,3	134,3			
19	1288	3354		4,6	154,6	0	3228		3,2	138,4			
20	1339	4242		5,6	161,8	0	4141		4,1	143,8			

**Annexe V :** Graphique de l’humidité absolue (HA) dans la serre témoins et économique selon la position des écrans et de la ventilationJet, sur la période du 06/04 au 19/04.





**Annexe VI :** Tableau de données de la récolte du 30/05/2024, selon le type de conduite et la variété.

Parcelle	Conduite	Variété	Rendement (kg/m²)	Nb grappes récoltées/m	Poids moyen
657	SERRILIENCE	Xaverius	13,9	21,1	131
661	SERRILIENCE	Xaverius	13,9	21,6	129
665	SERRILIENCE	Xaverius	14,9	22,2	134
	<b>SERRILIENCE</b>	<b>Xaverius</b>	<b>14,2</b>	<b>21,6</b>	<b>131</b>
658	SERRILIENCE	Sunvine	14,5	24,1	114
660	SERRILIENCE	Sunvine	14,1	23,9	113
668	SERRILIENCE	Sunvine	13,6	21,5	120
	<b>SERRILIENCE</b>	<b>Sunvine</b>	<b>14,1</b>	<b>23,2</b>	<b>116</b>
659	SERRILIENCE	Rhodium	14,9	24,9	120
663	SERRILIENCE	Rhodium	14,8	24,1	124
667	SERRILIENCE	Rhodium	14,0	23,7	119
	<b>SERRILIENCE</b>	<b>Rhodium</b>	<b>14,6</b>	<b>24,2</b>	<b>121</b>
662	SERRILIENCE	Ronvine	12,1	19,0	122
664	SERRILIENCE	Ronvine	13,4	21,2	121
666	SERRILIENCE	Ronvine	13,5	21,7	119
	<b>SERRILIENCE</b>	<b>Ronvine</b>	<b>13,0</b>	<b>20,7</b>	<b>120</b>
643	SERRILIENCE	Fendicia	10,8	21,8	96
645	SERRILIENCE	Fendicia	13,4	24,6	105
	<b>SERRILIENCE</b>	<b>Fendicia</b>	<b>12,1</b>	<b>23,2</b>	<b>100</b>
649	SERRILIENCE	Climundo	11,1	16,9	127
655	SERRILIENCE	Climundo	10,9	17,0	126
	<b>SERRILIENCE</b>	<b>Climundo</b>	<b>11,0</b>	<b>17,0</b>	<b>127</b>
650	SERRILIENCE	DRTH 0055	10,9	17,0	125
654	SERRILIENCE	DRTH 0055	11,0	17,3	123
	<b>SERRILIENCE</b>	<b>DRTH 0055</b>	<b>11,0</b>	<b>17,2</b>	<b>124</b>
651	SERRILIENCE	Xaverius XR	13,8	24,5	114
653	SERRILIENCE	Xaverius XR	14,2	24,0	120
	<b>SERRILIENCE</b>	<b>Xaverius XR</b>	<b>14,0</b>	<b>24,2</b>	<b>117</b>
543	TEMOIN	Xaverius	14,7	21,9	138
547	TEMOIN	Xaverius	14,4	21,2	136
551	TEMOIN	Xaverius	16,4	23,9	139
	<b>TEMOIN</b>	<b>Xaverius</b>	<b>15,1</b>	<b>22,3</b>	<b>138</b>
544	TEMOIN	Sunvine	14,8	22,7	124
546	TEMOIN	Sunvine	14,0	22,7	118
554	TEMOIN	Sunvine	12,2	20,4	114
	<b>TEMOIN</b>	<b>Sunvine</b>	<b>13,7</b>	<b>21,9</b>	<b>118</b>
545	TEMOIN	Rhodium	15,5	25,3	123
549	TEMOIN	Rhodium	14,5	24,2	121
553	TEMOIN	Rhodium	12,0	22,6	109
	<b>TEMOIN</b>	<b>Rhodium</b>	<b>14,0</b>	<b>24,0</b>	<b>118</b>
548	TEMOIN	Ronvine	11,9	18,9	125
550	TEMOIN	Ronvine	11,8	19,0	120
552	TEMOIN	Ronvine	11,3	19,4	112
	<b>TEMOIN</b>	<b>Ronvine</b>	<b>11,7</b>	<b>19,1</b>	<b>119</b>

**Annexe VII :** Photo des variétés tests après conservation selon la variété témoin Xaverius. (Source : Glynis Bentoumi)



## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Dispositif de ventilation en conduite économique. Les flèches bleu foncé représentent la ventilationJet, les flèches bleu clair représentent la ventilation ClimaFlow. (Source : Ludvig Svensson)

Figure 2 : Graphique du nombre d'heures de fermeture hebdomadaire des écrans en serre économique et témoin selon la température extérieure.

Figure 3 : Graphique du nombre d'heures de fermeture hebdomadaire des écrans en serre économique et du nombre d'heures d'utilisation hebdomadaire de la VentilationJet selon la température extérieure.

Figure 4 : Graphique de la consommation thermique cumulée (KWh/m<sup>2</sup>) entre la serre témoin et économique Graphique de la consommation thermique cumulée (KWh/m<sup>2</sup>) entre la serre témoin et économique.

Figure 5 : Graphique du cumul de la consommation électrique (KWh/m<sup>2</sup>) du système de ventilation dans la serre économique.

Figure 6 : Boxplot du rendement pour les variétés en conduite économique.

Figure 7: Boxplot du rendement selon la variété en conduite économe et témoin.

Figure 8 : Evolution des Indices Brix des variétés dans la serre économique dans le temps.

## TABLE DES TABLEAUX

Tableau I : Tableau du nombre d’heures d’utilisation hebdomadaire de la ventilation Jet et des écrans thermique dans la serre économique et témoin selon la température extérieur.

Tableau II : Tableau du climat dans la serre témoin et économe, selon le climat extérieur (lumière et température extérieure).

## RESUME

Dans un contexte de hausse mondiale des prix de l'énergie, le secteur de la serriculture doit s'adapter pour faire face à l'explosion des coûts du gaz naturel. Le projet SERRILIENNE vise à réaliser des économies d'énergie liées au chauffage des serres. Ainsi, la station expérimentale du CATE a mis en place un essai utilisant un écran thermique de manière prolongée la nuit pour réduire le chauffage des serres, tout en maintenant des conditions optimales d'humidité grâce à un système de ventilation qui amène l'air présent au-dessus de l'écran thermique dans la serre. Dans un même temps, différentes variétés, on était testées pour déterminer lesquelles peuvent s'adapter à une conduite basse énergie.

Les résultats obtenus cette année et l'année précédente montrent que ce type d'installation est prometteur et pourrait permettre d'importantes économies d'énergie thermique tout en minimisant les coûts supplémentaires liés à la consommation d'énergie électrique. Certaines variétés ont démontré des rendements très intéressants pour une culture économique, bien que certaines présentent encore des défauts, notamment en matière de conservation ou d'aspect. D'autres tests devront être réalisés pour déterminer si ces variétés sont véritablement intéressantes à cultiver.

Mots clés : Economie d'énergie, écran thermique, ventilation, variété.

## ABSTRACT

In the context of rising global energy prices, the greenhouse farming sector needs to adapt to cope with the surge in natural gas costs. The SERRILIENNE project aims to achieve energy savings related to greenhouse heating. Thus, the CATE experimental station has implemented a trial using a thermal screen extended overnight to reduce greenhouse heating, while maintaining optimal humidity conditions thanks to a ventilation system that brings the air present above the thermal screen into the greenhouse. At the same time, various plant varieties were tested to determine which ones can adapt to low-energy management.

The results obtained this year and the previous year show that this type of installation is promising and could lead to significant thermal energy savings while minimizing additional costs related to electrical energy consumption. Some varieties have demonstrated very interesting yields for economical cultivation, although some still have shortcomings, particularly in terms of storage or appearance. Further tests will need to be conducted to determine if these varieties are truly worthwhile to cultivate.

Keywords: Energy savings, thermal screen, ventilation, variety.