

## Projet APAF\_Synthèse technique

Développement de stratégies sous abris froids afin de s'affranchir des phytosanitaires de synthèse tout en conservant la qualité des cultures

### P1: Mesures & Instrumentation climatique

La montée en gamme des serres de production, dans le monde du maraîchage notamment, permet de réaliser des productions avec une très bonne maîtrise des conditions climatiques et sanitaires. En France, la majorité des surfaces de culture sous abris est cependant constituée d'**abris froids** non chauffés, ne disposant pas de ces possibilités techniques. Le programme de recherche APAF (CASDAR, 2021-2024) avait pour objectif de réaliser un transfert de certains équipements high-tech vers les abris froids, afin d'**augmenter leur efficacité** et limiter l'utilisation des **produits phytosanitaires**. Plusieurs leviers ont été expérimentés :

- L'optimisation de la **maîtrise climatique** des serres
- L'**intégration de filets Insect-Proof** sur des serres pour diminuer la pression sanitaire des insectes
- L'**utilisation de la ventilation mécanique (brasseur et destratificateur)** pour homogénéiser l'air de la serre et limiter le confinement
- L'adaptation de la **conduite agronomique et sanitaire des cultures**

Avant de présenter les résultats, voici un rappel de quelques notions fondamentales sur les variables climatiques utilisées dans le cadre du projet, ainsi que la méthodologie pour les mesurer sous serre.

## GENERALITE SUR LES VARIABLES CLIMATIQUES

### L'humidité absolue et relative

On peut caractériser les propriétés d'un air humide de deux façons. Physiquement, la plus simple est de passer par la concentration en vapeur dans l'air, on parle alors d'**humidité absolue**, notée **HA**, en gramme par kilo d'air (ou en gramme par mètre cube d'air). Cette concentration ne peut dépasser une valeur dite "à la saturation" qui augmente avec la température, calculée via la pression de vapeur saturante notée  $P_{v,sat}(T_a)$

$$P_{v,sat}(T_a) = 6,112 \cdot \exp\left\{\frac{17,67 \cdot T_{air}}{T_{air} + 243,5}\right\}$$

avec  $P_{vapeur\ saturante}$  en hPa pour  $T_{air}$  en °C

et

$$HA_{max}(T_{air}) = 0,622 \cdot \frac{P_{v,sat}(T_a)}{1013,25 - P_{v,sat}(T_a)}$$

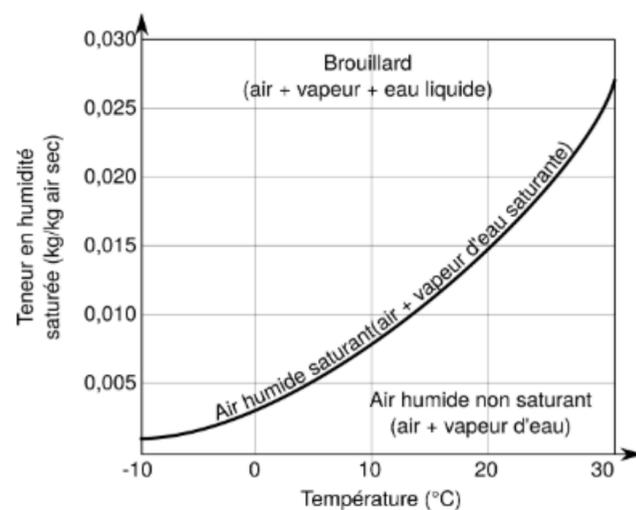


Fig.1 Teneur max en humidité en fonction de la température

Si cette grandeur est intéressante pour faire des bilans, l'humidité de l'air telle qu'elle est ressentie par les êtres vivants (plantes comme humains) ne correspond pas à cette valeur, et on passe en général par une autre grandeur, l'**humidité relative**, notée **Hr** qu'on peut prendre comme un "taux de remplissage" de l'air en vapeur (entre 0 et 100% ou entre 0 et 1) et que l'on calcule, pour un air à la température  $T_a$  comme le **ratio de la quantité de vapeur dans l'air sur la quantité maximale de vapeur qu'un air à la même température pourrait contenir**:

$$HR = HA_{réelle} / HA_{max}(T_a)$$

Pour une température connue, on peut passer de l'humidité relative à l'humidité absolue par la relation (Kg eau/Kg air sec):

$$HA = 0,622 \cdot \frac{HR \cdot P_{v,sat}(T_a)}{1013,25 - HR \cdot P_{v,sat}(T_a)}$$

## Le déficit hydrique et la transpiration foliaire

L'échange d'eau entre une feuille et l'air ambiant est un **phénomène passif régulé par les stomates**. L'eau passe de la phase liquide à la surface interne de la cavité stomatique à la phase gazeuse dans celle-ci, avant de diffuser vers l'extérieur et l'air ambiant.

Si l'on pose l'hypothèse que la chambre sous stomatique est saturée en vapeur d'eau, on peut formuler le flux d'eau, et donc **la transpiration**, comme étant égal à une différence de concentrations massiques en vapeur entre la chambre sous stomatique et l'air ambiant, le tout divisé par la résistance induite par le stomate d'une part, et la couche limite de la feuille d'autre part.

Dans ce cadre, on pose le **"déficit de pression de vapeur" DPV** exprimé en pression de vapeur, ou le **"déficit hydrique" DH** exprimé en kg de vapeur par kg d'air sec. Dans les deux cas, il s'agit de chiffrer la quantité de vapeur que l'on peut ajouter à un air à une certaine température avant d'arriver à la saturation. Pour une plante, cette grandeur quantifie **la facilité qu'une plante aura à transpirer**, et pour un être humain, cette grandeur fait la différence entre par exemple une chaleur sèche et une chaleur humide.

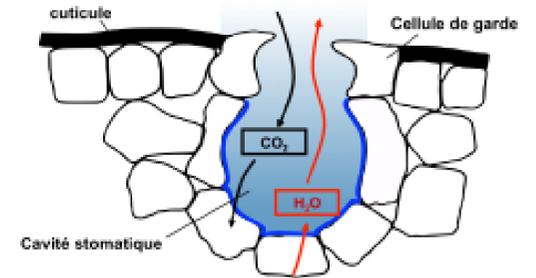


Fig.2 Schéma en coupe d'un stomate avec sa chambre sous-stomatique

$$DH = HA_{\max} - HA_{\text{réelle}}$$

$$DPV_a = P_{vsat}(T_a) \cdot (1 - HR)$$

## Température de rosée et développement fongique

Si on part d'un air contenant de la vapeur d'eau qui se refroidit (à la tombée de la nuit par exemple), l'humidité absolue restera constante (on ne retire ni n'ajoute pas de vapeur), mais **l'humidité relative va augmenter au fur et à mesure de la diminution de la température** : comme l'air refroidi peut contenir moins de vapeur, la quantité contenue représente un pourcentage de plus en plus important de ce maximum. Si la température diminue suffisamment, on finit par atteindre la **température de rosée** de l'air pour laquelle la quantité de vapeur présente devient égale à la quantité maximale que l'air peut contenir à cette température (cf. figure ci-dessous).

Si le refroidissement se poursuit, une partie de la vapeur présente dans l'air ne peut plus s'y maintenir et passe sous forme condensée i.e. **sous forme de rosée** (eau liquide). On a alors un apport d'eau sous forme liquide qui peut être la source de **développement fongique**, et une contrainte du pilotage du climat sera **d'éviter d'atteindre cette température de rosée**.

Pour des températures courantes sous serre, on peut calculer la valeur de la température de rosée à partir de la température de l'air (en °C) et de son humidité relative (entre 0 et 1) par :

$$T_{\text{rosée}} = \frac{237,7 \cdot \alpha(T, HR)}{17,27 - \alpha(T, HR)} \quad \text{avec} \quad \alpha(T, HR) = \frac{17,27 \cdot T}{237,7 + T} + \ln(HR)$$

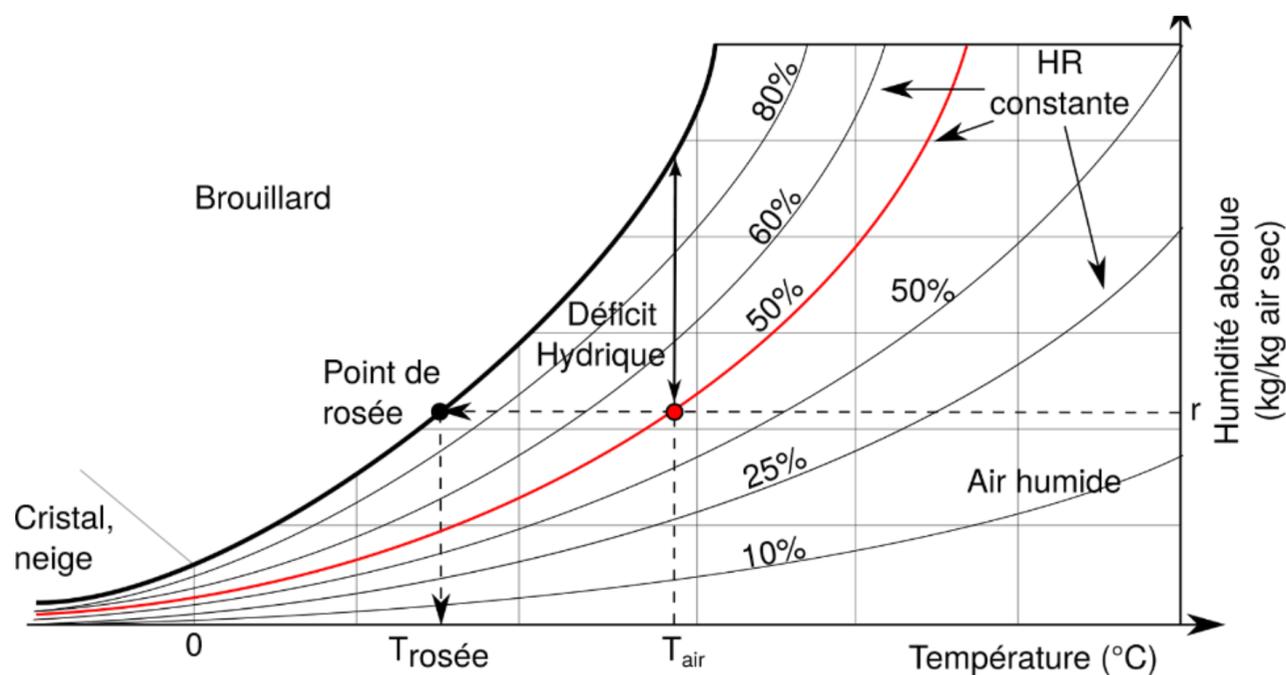


Fig.3 Diagramme psychométrique de l'air humide, qui permet de visualiser l'ensemble des paramètres de température, d'humidité relative, absolue, de déficit hydrique et de points de rosée

Des calculateurs en lignes existent pour naviguer entre les différentes unités :

<https://fr.planetcalc.com/2167/>

<https://www.processensing.com/en-us/humidity-calculator/rotronic/>

## CONDITIONS DE DEVELOPPEMENT DES MALADIES FONGIQUES

Tab.1 Caractéristiques des principales maladies fongiques retrouvées sous serre

Maladies	Principales caractéristiques	Symptômes	Conditions de développement
<b>Oïdium</b>	Plusieurs espèces appartenant à l'ordre des Erysiphales. Parasite obligatoire et biotrophe, avec plus de 1000 espèces hôtes notamment les solanacées.	<p>- <b>Symptômes majeurs</b> : Présence d'un duvet blanchâtre sur la face supérieure des feuilles, boutons floraux, fleurs, jeunes fruits, tiges et jeunes pousses</p> <p>- <b>Autres</b> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Taches pourpres au niveau des feuilles chez le fraisier</li> <li>•Malformation du feuillage, des boutons floraux et des fruits.</li> <li>•Avortement et dessèchement des fleurs</li> <li>- Oïdium interne : défoliation des plants</li> <li>- Oïdium externe : Impact indirect ; limite la photosynthèse</li> </ul>	<p>1) Température optimale pour le développement [15-26°C]</p> <p>2) Humidité relative:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour la <b>germination des spores</b>: Optimal à saturation, mais germination possible même à faible humidité</li> <li>- Pour la sporulation: HR entre 70 et 85%</li> <li>- <b>Pour la dispersion des spores</b> : La diminution de l'humidité augmente la dispersion des spores dans l'air.</li> </ul> <p>Donc, la pire des situations: Journées chaudes et sèches (sporulation) suivies de nuits froides et humides (germination). Faible intensité lumineuse, ou lieu ombragé, avec une présence de rosée. Les courants d'air favorisent la dissémination des spores, et les blessures favorisent la pénétration du champignon.</p>
<b>Mildiou</b>	Plusieurs genres : Phytophthora, Peronospora et Plasmopara. Avec une gamme d'hôtes très large (plantes ornementales et légumières) Perte économique importante	<p>-<b>Symptômes majeurs</b> : Taches jaune pâle à rouge pourpre et nécrotiques sur face supérieure des feuilles; duvet blanchâtre ou grisâtre sur face inférieure. Jaunissement et enroulement des feuilles</p> <p>- <b>Autres</b> : Nanisme et déformation des boutons floraux</p>	<p>1) Température optimale pour le développement [8-16°C] de nuit suivi de journées chaudes (Mildiou du basilic requiert des T°C de 20°C)</p> <p>2) Humidité relative importante pour l'ensemble des stades.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour la germination des spores: HR&gt;85%</li> <li>- Pour la sporulation: HR&gt;90%</li> <li>- Pour l'infection: HR&gt;80%</li> </ul> <p>Les conditions sèches et T°C &gt; 27°C inhibe la maladie</p>
<b>Moisissure grise</b>	Polyphage, affecte tous les organes sauf les racines. Plantes sous serres et en plein champ  -Tissus vivants et nécrotiques (parasite facultatif ou saprophyte)	<p>- Feuille : brûlures ou taches beiges à grises et d'aspect humide</p> <p>- Fleur : brunissement/pourriture humide recouvert d'un duvet gris</p> <p>-Tige : lésions beiges à marrons, humides et de plusieurs centimètres de long.</p> <p>-Fruit : anneaux blanchâtres encerclant une petite lésion nécrotique centrale</p>	<p>1) Température optimale pour le développement [16-25°C] (Mildiou du basilic requiert des T°C de 20°C)</p> <p>2) Humidité relative &gt; 85% pendant 6 h</p> <p>3) Condensation et feuillage mouillé sur une longue période.</p> <p>Les blessures de taille et organes morts sont des sources de contamination, ainsi que le vent, la ventilation, l'eau et les insectes. Le botrytis peut se conserver (sclérote).</p>

On constate que les principales maladies fongiques retrouvées sous serre n'ont pas toutes les mêmes symptômes et conditions de développement. Il est donc nécessaire d'avoir une métrologie adaptée pour suivre avec précision **les périodes favorables** d'apparition des maladies fongiques.

Un autre élément important est la nécessité de suivre **la présence d'eau sur les feuilles**:

- Elle peut provenir d'un arrosage → Levier mobilisable par le producteur afin de prévoir un arrosage le matin pour un séchage des feuilles plus rapide.
- Elle peut aussi **provenir de la condensation**. Si la température de la feuille est proche du **point de rosée**, il y a des risques de condensation. Des appareils de mesure spécifiques existent, mais en culture sous serre, la précision et l'utilisation de ces solutions n'ont pas été optimales. Nous avons choisi de nous baser **sur une approche avec un calcul afin de déterminer le point de rosée**.

→ Le prérequis est donc d'avoir une métrologie adaptée.



## TECHNOLOGIES DE MESURE

### Standardiser la prise de température et d'humidité

Sous abris, les mouvements d'air sont fortement limités par rapport à une situation en extérieur. L'utilisation des abris de protection passifs ne permet pas une mesure complètement fiable de la température de l'air pendant la journée. Lors des journées ensoleillées, l'effet d'échauffement lié au rayonnement va augmenter la température du boîtier de protection de manière excessive et donner des températures faussées. Pour pallier cela, il est nécessaire d'utiliser un **boîtier de protection ventilé mécaniquement**. Le ventilateur va permettre d'apporter un flux d'air constant aux capteurs assurant des mesures fiables.

La nuit cependant, les données sont similaires entre les deux boîtiers.



### Disposition des boîtiers de mesure

Tout dépend de la mesure que vous voulez obtenir!

Si l'objectif est d'avoir une idée du climat à proximité immédiate des cultures, il faut disposer le boîtier **très proche des végétaux**. En journée, la stratification de l'air est importante sous serre (température plus élevée en haut de la serre qu'au niveau des cultures). Entre une prise de mesure au niveau de la culture ou à 1,5m de hauteur, il peut y avoir des écarts de **plusieurs degrés**.



### Mesure de la température foliaire ?

La température de feuille semble donc un élément important pour suivre de manière plus précise **les risques de condensation** sur le végétal. **Plusieurs solutions ont été évaluées dans le cadre du projet:**

## COMMENT MESURER LE MICROCLIMAT DU VEGETAL ?

### Dispositif expérimental



T°C boîtier ventilé 0,5m

T°C du substrat

T°C boîtier passif



T°C du végétal (dans la végétation)

Dispositif complet de test sur chrysanthème



T°C de feuille avec sonde aimantée



T°C boîtier ventilé 1,5m



Serre plastique, simple paroi, Brindas (69)

Culture de Chrysanthème en pot de 3,5l.

Instrumentation climatique réalisée sur 2 points de mesures dans la serre (point A et B) en août 2022.

**Journée ensoleillée (14 août 2022):** Les températures suivent l'évolution du rayonnement, avec un décalage d'environ 1 à 2h. Il y a des différences importantes pendant la journée avec:

$T^\circ \text{ Boitier passif} > T^\circ \text{C Substrat} > T^\circ \text{C Boitier ventilé (0,5m)} \Rightarrow T^\circ \text{C Boitier ventilé (1,5m)} > T^\circ \text{ végétal} > T^\circ \text{C feuille}$

Pendant la nuit, les écarts sont fortement réduits, sauf pour la température du substrat et pour la température relevée à 1,5m du sol.

**Lors d'une journée nuageuse (15 août 2022)** la même hiérarchie est observée mais avec des écarts plus réduits.

La température de feuille peut varier de manière importante. De plus, les capteurs sont relativement chers et fragiles (fixation aimantée sur une feuille). Une alternative plus facile à mettre en œuvre par le producteur et qui offre de bons résultats est l'utilisation d'un capteur positionné dans la végétation

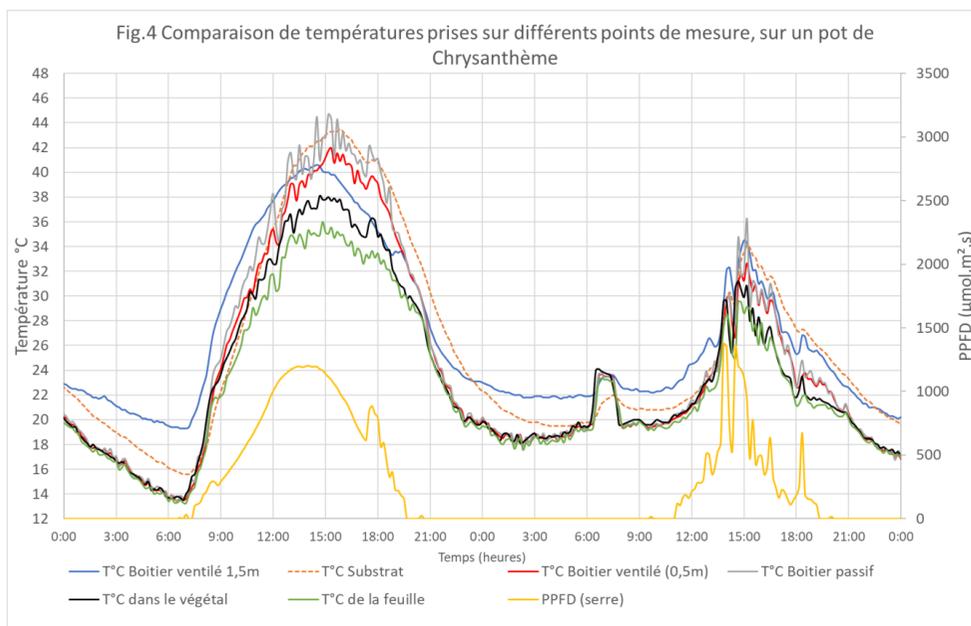
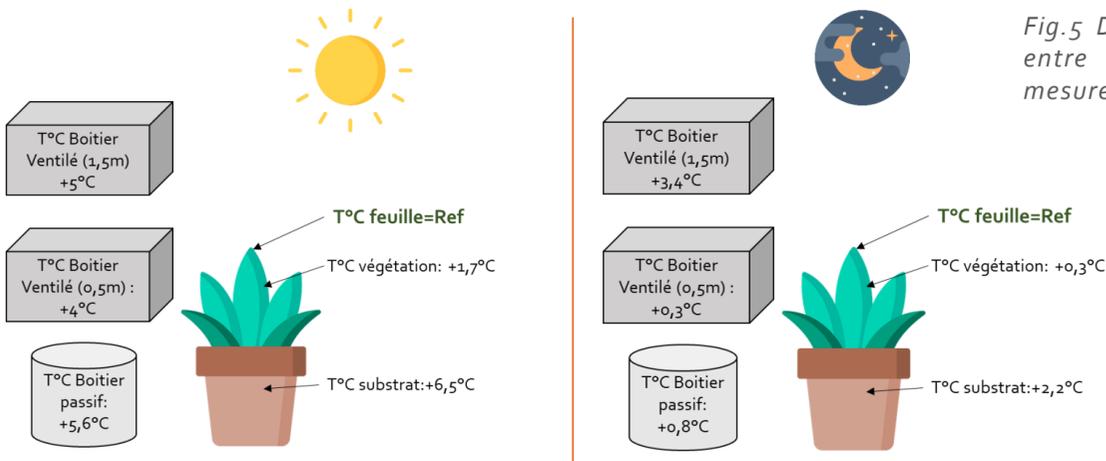
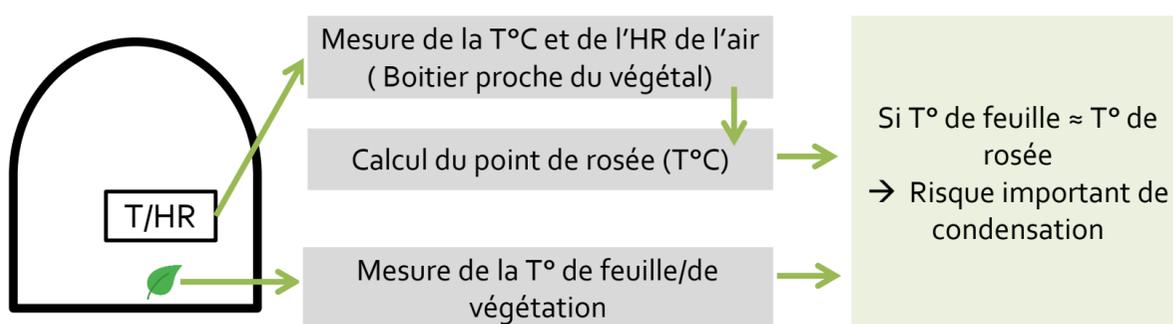


Fig.5 Différence de température moyenne sur le mois d'août entre la référence (T°C de feuille) et les autres prises de mesures sur la période du zénith (gauche) et de la nuit (droite)



Cette mesure est soumise aux radiations, elle ne doit donc pas être utilisée pour un pilotage (ouverture des ouvrants) mais peut aider pour détecter de manière plus précise les conditions de culture du végétal ou encore le point de rosée.

En pratique, comment intégrer cette mesure ?



**EXEMPLE:**  
En octobre, le point de rosée à 21h était à 11,2°C et l'air avait une HR de presque 100%. Il y avait donc un risque fort de condensation. Le producteur aurait pu être amené à prendre des mesures: aérations plus importantes, traitement préventif...

Hors, la mesure foliaire indiquait une T° de 12,3°C. Le risque de condensation était donc plus faible en tenant compte de la température des feuilles

## Projet APAF\_Synthèse technique

Développement de stratégies sous abris froids afin de s'affranchir des phytosanitaires de synthèse tout en conservant la qualité des cultures

### P2: Les filets insect-proof

En production maraîchère et horticole sous-abris, l'ouverture des ouvrants des serres pendant la période estivale constitue un facteur favorisant l'**entrée de ravageurs aériens**. Ces derniers causent des dégâts sur les rendements des cultures maraîchères et ornementales. Pour y faire face, l'installation de filets permet de créer une **barrière physique** efficace pour réduire la pression des insectes ravageurs. La taille de la maille et le matériau sont des critères de choix et doivent s'adapter à la culture et au ravageur ciblé (Le Point sur CTIFL n°12, février 2016). Le tableau suivant présente les principaux ravageurs rencontrés en culture maraîchère et horticole et la taille de leur abdomen. Les filets disponibles diffèrent en fonction de leur porosité, de leur couleur, du mode de confection et de leur composition (polyéthylène, polyamide et polyester). Ce dernier impacte le coût, la durée de vie, la résistance à l'abrasion et aux UV.

Tab.2 Taille des principaux ravageurs en horticulture et maraichage

Ravageurs	Tailles de l'abdomen
Acariens Tétranyques	250 à 500 µm
Thrips	1000 à 2015 µm
Aleurodes	1000 à 3000 µm
Pucerons	1000 à 4000 µm
<i>Tuta absoluta</i>	5000 à 7000 µm
Cicadelle	>2000µm
Lygus	>4000µm

**Cependant, l'installation de filets peut modifier le climat dans l'abri.**

→ Dans le cadre du projet APAF, le choix a été fait d'utiliser un filet *Insect-proof* (Ultra-R, TIP 260, TEXINOV) qui constitue une barrière physique jusqu'à la taille des aleurodes (maille de 250 µm x 720 µm).

→ **Le choix du filet doit être fait en lien avec les ravageurs ciblés!**

## QUEL EFFET DES FILETS SUR LE CLIMAT EN ÉTÉ ?

### Culture de concombre (avec bassinage)

L'analyse du climat a été réalisée sur le mois de **juin 2023**. Le tunnel était séparé en **2 compartiments** de 20m, un **compartiment témoin** et un compartiment équipé d'un **filet Insect-Proof (IP)**. Chaque zone était équipée avec des boîtiers de mesure ventilés à 0,5m, 1,5m et 2,5m par rapport au sol. Il ressort que:

- L'effet d'un bassinage (aspersion de courte durée) **persiste plus longtemps** dans la serre IP.
- Le tunnel IP permet de **diminuer l'effet du vent** (-55%) sur les planches extérieures et **d'homogénéiser** le climat. Il occasionne un ombrage de 9%.
- En journée à 0,5 m et 1,5 m, la température du compartiment IP est **légèrement inférieure** à celle du compartiment témoin, avec respectivement 1 °C et 1,75°C de moins par rapport au témoin. A l'inverse, à 2,5m c'est le compartiment IP qui est plus chaud avec 2,24 °C de plus que le témoin.
- Le **Déficit Hydrique (DH)** est **plus faible** dans le tunnel IP à toutes les hauteurs mesurées.
- La nuit, les différences climatiques entre les compartiments sont quasiment nulles.



Tab.3 Climats dans les compartiments Témoin et Insect-Proof (IP) en journée et pendant la nuit, sur le mois de juin 2022.  
T°: température de l'air et DH: Déficit hydrique

Hauteurs de mesure	Jour entre 12h et 14h				Nuit entre 22h et 6h			
	T° serre IP	T° serre Témoin	T°IP - T°Témoin	% temps où T°IP > T°Témoin	T° serre IP	T° serre Témoin	T°IP - T°Témoin	% temps où T°IP > T°Témoin
2,5 m	31,5	29,2	2,2	81%	17,4	17,4	0	57%
1,5 m	27,6	29,3	-1,7	6%	17,2	17,5	-0,3	22%
0,5 m	26,5	27,5	-1,0	23%	17,6	17,6	0,04	61%
	DH serre IP	DH serre Témoin	DH IP - DH Témoin	% temps où DH IP > DH Témoin	DH serre IP	DH serre Témoin	DH IP - DH Témoin	% temps où DH IP > DH Témoin
2,5 m	14,6	16,3	-1,7	29%	2,3	2,8	-0,5	40%
1,5 m	10,3	14,2	-3,9	3%	2,2	3,6	-1,3	4%
0,5 m	8,9	11,7	-2,7	19%	2,2	2,8	-0,5	25%

Sur cette 1<sup>ère</sup> série de concombres, le compartiment IP semble induire **un climat plus favorable** à l'intérieur du tunnel pour la culture. En effet, les plants sont plus vigoureux et présentent **un rendement 2,5 fois plus important** dans le compartiment équipé de filets avec 23 concombres/m<sup>2</sup> contre 9 dans le témoin.

### Culture de plantes en pot (sans bassinage)

- Le filet réduit **les effets du renouvellement** d'air avec l'extérieur.
- En l'absence de bassinage, **le filet augmente la température** au niveau des cultures de 1°C en moyenne sur l'été 2022 par rapport au témoin.
- L'humidité absolue ou le déficit hydrique **ne change** pas dans la serre avec ou sans filet *Insect-proof*.



## QUEL EFFET DES FILETS SUR LE CLIMAT EN HIVER ?

Sur la culture d'intersaison (salades et cultures de bisannuelles) :

- Le filet augmente légèrement **le risque d'apparition de maladies fongiques** (humidité relative supérieure)
- La masse des salades, après parage (retrait des feuilles atteintes par la maladie) est cependant **supérieure de 18%** comparée aux laitues dans le compartiment témoin.
- Le filet permet de bien plaquer la barre d'enroulement de l'aération, **limitant ainsi les déperditions** pendant la nuit.



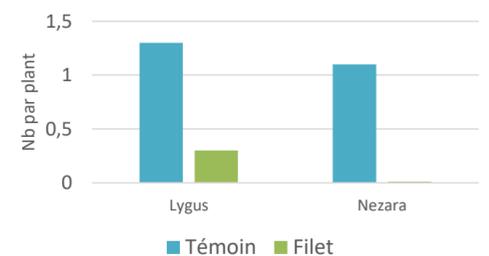
## QUEL EFFET DES FILETS SUR LES RAVAGEURS?

### Cicadelle, Lygus, Nezara, Lepidoptère

La quantité de *Lygus* et de *Nezara* observée dans la modalité témoin est nettement supérieure à la modalité IP. Pour les cicadelles et papillons, le constat est similaire avec un **affranchissement presque complet** de ces derniers avec filet.

Le filet *insect-proof* a donc **bien joué son rôle de barrière physique**.

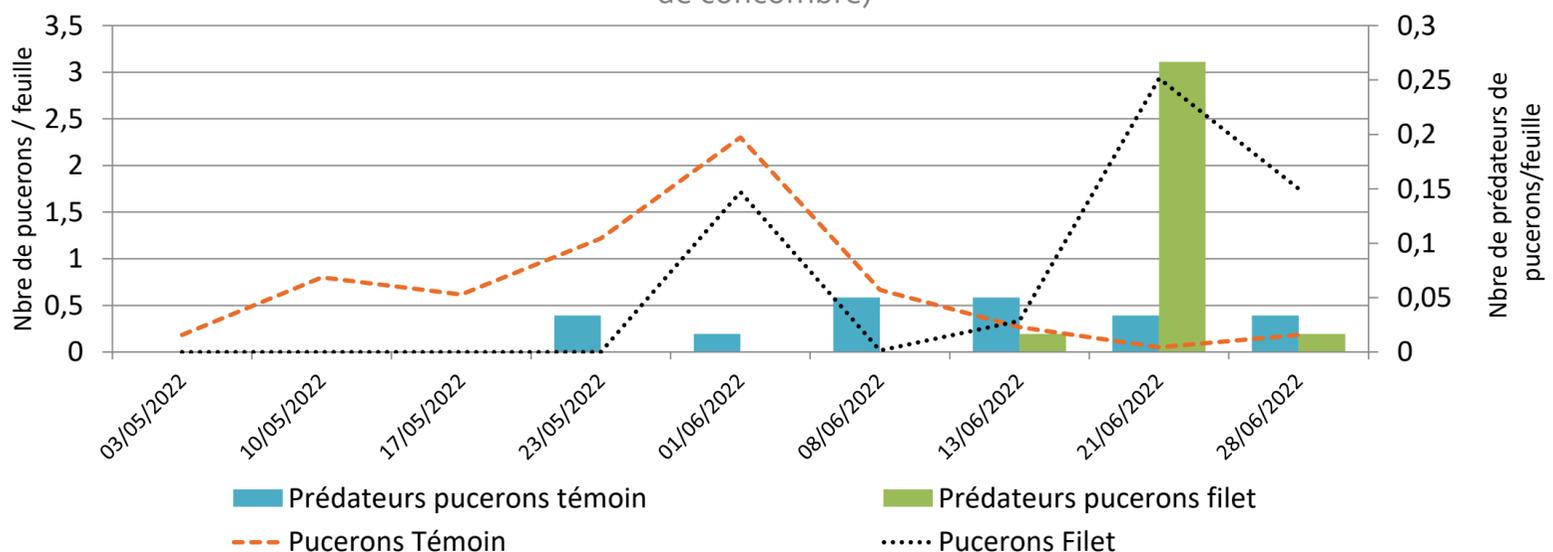
Fig.6 Population de Lygus et Nezara (culture de concombre)



### Pucerons

Le filet utilisé a une maille permettant théoriquement de **freiner les pucerons**. Il ressort des essais que les pucerons restent tout de même problématiques. Au début de la culture, **le filet semble ralentir l'arrivée ou la progression des pucerons** dans la parcelle. Cependant après quelques semaines, **l'augmentation des pucerons est importante et problématique**. Le filet **freine logiquement les arrivées des auxiliaires** (syrphes et parasitoïdes) si bien que dans des parcelles de plantes en pot, les plantes ont été plus dégradées par les ravageurs sous les serres avec les filets.

Fig.7 Evolution des pucerons et auxiliaires en fonction des modalités et du temps (Serre de concombre)



### Thrips

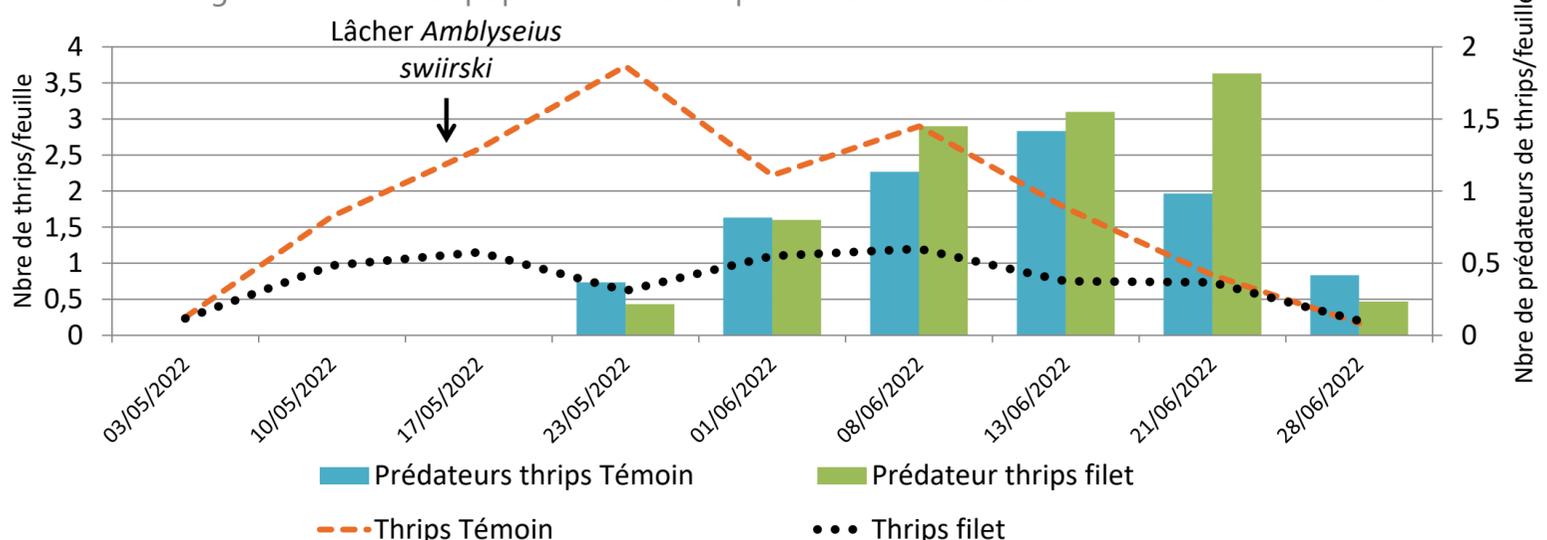
Le filet ne permet pas un affranchissement complet du passage du thrips. **La limitation de ce ravageur a été constatée en maraîchage dans le compartiment IP (Fig.8)**. Les acariens prédateurs Phytoséiides lâchés dans chaque compartiment se développent mieux dans le **compartiment avec filet**.

En horticulture, les résultats ont été moins favorables; **de nombreux thrips** ont été présents dans la serre avec *Insect Proof*. **Les auxiliaires ont été fortement limités** et les lâchers n'ont pas permis de réguler les populations. **Les cultures ont été dégradées**.

**Hypothèses ?** Grâce au filet et au bassinage en maraîchage, le climat est plus humide (Tab.3), et donc défavorable au thrips. De plus le filet va limiter la sortie des auxiliaires, augmentant ainsi les populations.

En revanche, en absence de bassinage, la température est plus importante et l'humidité relative plus faible. Le climat est propice aux thrips et non aux auxiliaires!

Fig.8 Evolution des population des thrips et des auxiliaires en fonction des modalités



## Projet APAF\_Synthèse technique

Développement de stratégies sous abris froids afin de s'affranchir des phytosanitaires de synthèse tout en conservant la qualité des cultures

### *P3: Le brassage d'air sous abris froids*

Le brassage d'air sous abris est une technique utilisée depuis de nombreuses années, avec pour objectif principal l'homogénéisation des températures dans l'espace de production. Ces dispositifs sont donc à différencier des aérothermes, déshumidificateurs et autres systèmes de chauffage à air pulsé.

Actuellement, on distingue **2 types de dispositifs mécaniques**, qui permettent de limiter les écarts climatiques (température, humidité, CO<sub>2</sub>) horizontalement et verticalement dans la serre. Ils sont à positionner **sous les écrans thermiques**.

## LES VENTILATEURS HORIZONTAUX

Les brasseurs sont disposés en hauteur, sous le faîtage de la serre et vont exercer une circulation horizontale de l'air. Le positionnement des brasseurs doit permettre de déplacer l'air dans la serre en générant une circulation homogène. Des exemples de plan d'installation sont disponibles sur cette ressource:

[https://www.agrireseau.net/legumesdeserre/documents/Vent\\_MG\\_2004.pdf](https://www.agrireseau.net/legumesdeserre/documents/Vent_MG_2004.pdf)



Quelques ordres de grandeur sont avancés par certains conseillers/fournisseurs, à savoir une capacité de brassage annoncée qui devrait se situer entre 2 à 4 volumes par heure.

Exemple: *Pour une serre de 19,2 m de large, 50m de long et 5 m de hauteur, (soit un volume 4800 m<sup>3</sup>) la capacité du brassage devrait être approximativement de 14 400 m<sup>3</sup>/h. La vitesse d'air au niveau des cultures devra être comprise entre 0,2 et 1m.s* Brazeau, Berger, 2018).

## LES VENTILATEURS VERTICAUX OU DESTRAFIFICATEUR

Ces dispositifs vont créer un brassage vertical dans la serre directement en **mixant les strates hautes et basses** (l'air chaud étant plus léger que l'air froid). Il ressort que ces dispositifs permettent un brassage **plus homogène de l'air**, en travaillant de fait, sur des distances plus réduites.

Il faut compter en fonction des hauteurs de serre, **1 destratificateur** pour environ 200 à 300 m<sup>2</sup> au sol. Les vitesses d'air sont **également faibles**, limitant le stress sur le végétal. Il est nécessaire d'avoir une hauteur entre le sol et le dispositif **de 4m au minimum**.

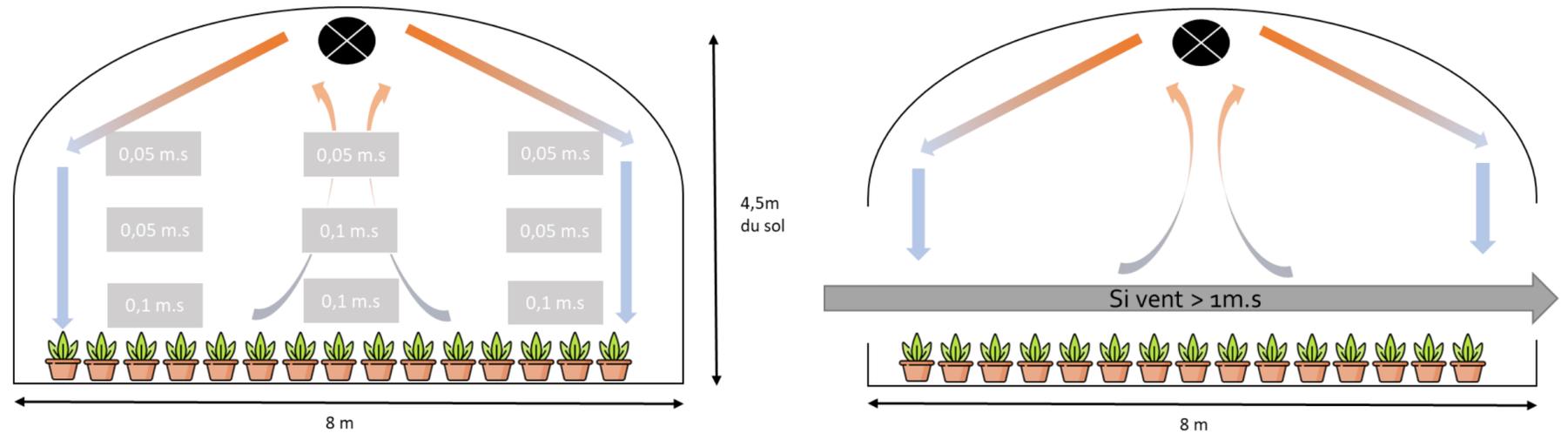


## QUEL EFFET SUR LE CLIMAT ET LA CULTURE ?

### Ventilateurs verticaux/destratificateurs en abris froid

Réalisation d'un test aéraulique (Clauger, 69) en amont de l'expérimentation. Serre simple chapelle. Destratificateur (V-Flo, Vosterman, 5050m<sup>3</sup>.h, fixation à une hauteur de 4,5m du sol). Taux de brassage de 8 volumes par heure.

Fig.10 Schéma du mouvement d'air induit par le destratificateur dans la serre (coupe frontale) avec les ouvrants ouverts ou fermés.



**Ouvrants latéraux fermés:** Les vitesses d'air sont très homogènes dans la serre et sont de l'ordre de 0,05 à 0,1 m/s

**Ouvrants latéraux ouverts:** Une vitesse de vent faible mais supérieure à 1 m/s va considérablement modifier les flux d'air dans la serre et sera dominant sur l'effet du destratificateur.

Pendant les 3 années du projet, plusieurs cultures ont été réalisées, sur plusieurs périodes de l'année, avec et sans destratificateur.

Tab.4 Synthèse des effets observés par le destratificateur pendant l'intégralité du projet, sur le climat et les cultures.

Saisons de culture	Hiver et Printemps (culture de bisannuelle, de plantes de printemps)	Estivale (culture de juin à octobre ex: aromatique, chrysanthème)
Position des ouvrants latéraux	Fermé en majorité	Ouvert en majorité
Effet sur le climat	En journée, le destratificateur remplit bien son rôle, les écarts de températures entre le haut et le bas de la serre passent de 7°C sans destratificateur à 3°C avec le destratificateur en marche. Il y a donc un climat plus homogène pour des cultures palissées.	
	<p><b>Lors de journées froides mais ensoleillées,</b> le destratificateur ne change pas le climat à proximité des cultures (au sol) . Il peut y avoir une légère augmentation de la T°C au sol au lever et au coucher du soleil sous l'effet du destratificateur.</p> <p><b>Lors de journées très froides et couvertes:</b> le destratificateur va réduire la température dans la serre (<b>augmentation des pertes thermiques</b> à travers les parois avec l'extérieur de la serre).</p> <p><b>La nuit,</b> en l'absence de stratification, le destratificateur ne change pas le climat ou peut avoir un effet négatif (-0,5°C) si la température extérieure est très froide.</p>	Le destratificateur <b>ne change pas le climat</b> à proximité du sol (température et humidité). Le vent domine rapidement l'effet du destratificateur
Effet sur les cultures	<ul style="list-style-type: none"> <li>•50% des plantes étudiées ont une masse, une hauteur ou un diamètre plus faible dans la serre avec le ventilateur. Les plants sont donc plus compacts</li> <li>•Diminution des taches de pourritures sur fleurs</li> <li>•Évaporation plus rapide des gouttelettes d'eau sur les feuilles</li> </ul>	<b>Aucun effet différenciant</b> sur les cultures (évaluation sur des plantes aromatiques, chrysanthème pendant 2 saisons consécutives)

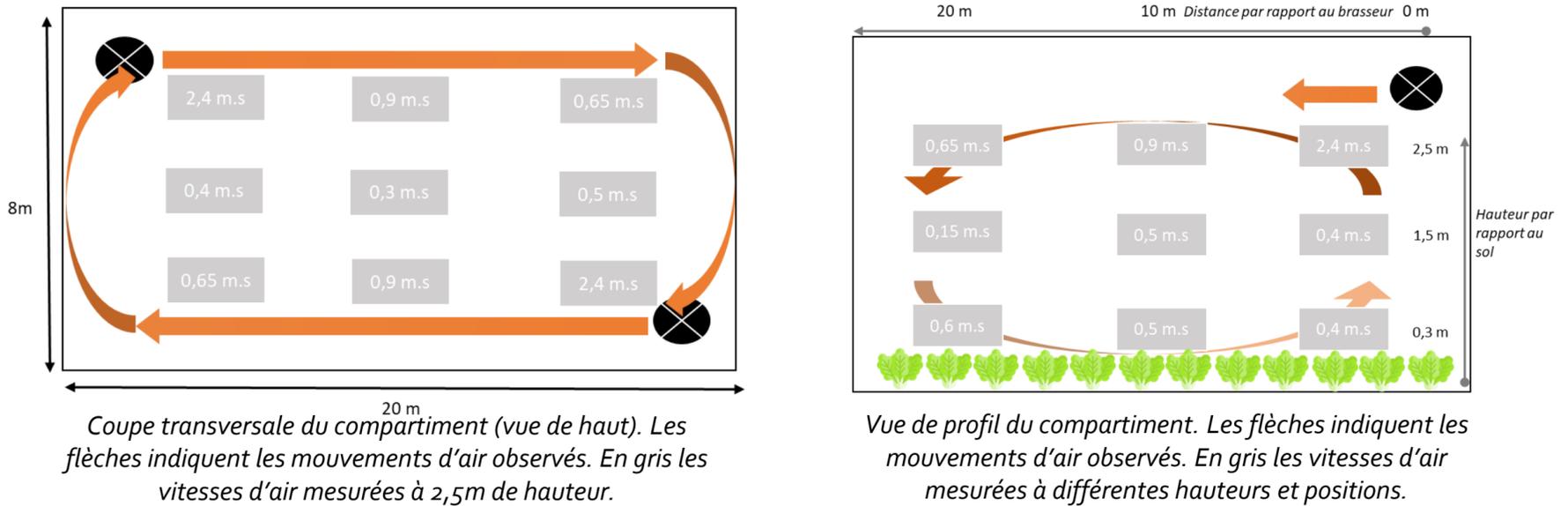


## QUEL EFFET SUR LE CLIMAT ET LA CULTURE ?

### Ventilateurs horizontaux/brasseurs en abris froid

Réalisation d'un test aéraulique (Clauger, 69) en amont de l'expérimentation. Serre simple chapelle de 8m par 20m de long, équipée de filet insect-proof. 2 brasseurs d'air, de 2550m<sup>3</sup>.h, fixés à une hauteur de 3m du sol). Taux de brassage de 9,2 volumes par heure.

Fig.11 Schéma du mouvement d'air induit par le destratificateur dans la serre (coupes frontale et transversale)



Plusieurs cultures ont été réalisées, sur plusieurs périodes de l'année, avec et sans brasseur.

Tab.5 Synthèse des effets observés par le brasseur pendant l'intégralité du projet, sur le climat et les cultures.

Saisons de culture	Hiver et Printemps (Salades)	Estivale (culture de juin à octobre ex: Aubergine, Concombre)
Effet sur le climat	En journée, les brasseurs d'air permettent d'avoir <b>un climat plus homogène</b> au sein de la serre. Avec les brasseurs en marche, la différence de température entre le haut de la serre et le bas est de 2°C contre 5°C sans brasseur. Avec brasseur, la température à midi à 2.5m est moins chaude de environ 2°C et la partie inférieure dans le végétal est légèrement plus chaude (jusqu'à 1 °C). Néanmoins, <b>aucun impact sur l'humidité relative</b> au sein de la serre. De nuit, le brasseur d'air ne semble pas influencer sur le climat de la serre	
Effet sur les cultures	<b>Pas d'impact des brasseurs</b> d'air sur le rendement et la vigueur des cultures d'intersaison (laitue)	Les plants d'aubergine présentent <b>une vigueur plus importante</b> et une croissance plus rapide dans le compartiment avec brasseur d'air <b>Le rendement d'aubergine est supérieur</b> d'environ 17% dans le compartiment ventilé par rapport au compartiment non ventilé. <i>Hypothèses ? Sur les cultures hautes, les brasseurs apportent un mouvement de l'air plus important à l'intérieur du feuillage. Le brasseur permet de renouveler l'air autour du feuillage, d'augmenter l'évapotranspiration et donc de favoriser la photosynthèse et la vigueur des plants</i>
Effet sur les ravageurs & maladies	<b>Maladies</b> : Les brasseurs d'air semblent augmenter la pression de maladies cryptogamiques ( <i>G. cichoracearum</i> , <i>B. cinerea</i> et <i>R. Solani</i> ) <b>Ravageurs</b> : Pas d'impact du brasseur <i>Hypothèses ? Dispersion et dissémination des spores par le brassage de l'air. Augmentation de la température au niveau du sol par la descente de l'air chaud</i>	<b>Maladies</b> : aucun effet du brasseur sur les maladies cryptogamiques des aubergines. <b>Ravageurs</b> : Différence existante entre les modalités mais non attribuée à l'effet du brasseur d'air.



## Projet APAF\_Synthèse technique

Développement de stratégies sous abris froids afin de s'affranchir des phytosanitaires de synthèse tout en conservant la qualité des cultures

### *P4: Bilans technico-économiques des systèmes*

#### Hypothèses de base du système de calcul

Abris froids mono-chapelle plastique de 8m de large par 40m de long; soit 360m<sup>2</sup> au sol.  
Double aération latérale de 4m de haut par 35m de long soit 280 m<sup>2</sup> d'aération.  
Les calculs sont présentés en m<sup>2</sup> au sol.

### Charges supplémentaires des leviers testés

#### Instrumentation climatique complète de la serre

L'instrumentation proposée et utilisée dans le cadre du projet comporte **un mat météo extérieur complet, une sonde de température** dans la serre ainsi que le contrôle **des 2 moteurs des aérations**. En plus d'améliorer le contrôle du climat, l'instrumentation va permettre un gain de confort de l'exploitant en permettant un accès et un contrôle à distance de ses aérations et une sécurisation (fermeture automatique en fonction du vent et de la pluie). Le système est intégrable sur une installation existante et n'entraîne pas de gros travaux (Xenilabs, 6g)

Instrumentation climatique complète (Amortissement sur 7 ans)	1,5 €/m <sup>2</sup> /an
Abonnement (qui peut être utilisé pour l'ensemble du site)-Hypothèse d'abris de 1500m <sup>2</sup>	0,8 €/m <sup>2</sup> /an

#### Filet Insect-Proof

Le filet peut être installé par l'exploitant directement de manière **fixe ou amovible**. Pour une installation fixe, mieux vaut privilégier les clés à lyres à condition qu'elles soient mises à demeure. La deuxième option est faisable avec des clips de serres. Dans les deux cas, il faudra bien penser à installer des **fermetures éclairs** ou autres possibilités d'ouvrants pour faciliter ces interventions. Il faudra penser à un système de levage de ces filets pour du nettoyage de la parcelle (pleine terre). D'une manière générale, les fixations à demeure par rapport aux fixations amovibles sont à privilégier, avec l'utilisation de double rail de fixation.

La qualité d'installation du filet impacte **grandement la durée de vie et son efficacité**. Dans notre essai, en situation plein sud et fortement exposé au vent, on constate des traces d'usure sur quelques zones fortement sujettes **aux frottements** sur les montants de la serre. Pour le reste, le filet est toujours intact et avec **une bonne intégrité**

Filet <i>Insect Proof</i> (amortissement sur 4 ans)	0,01 €/m <sup>2</sup> /an
Installation du filet (2 personnes, 1 journée, 20€.h)	0,20€/m <sup>2</sup> /an

#### Brasseurs d'air et destratificateurs

Les brasseurs et destratificateurs peuvent être installés directement par l'exploitant, s'il dispose des habilitations électriques. Cependant, **le dimensionnement de ces installations est primordial** sous peine de n'avoir aucun bénéfice ou de détériorer encore plus le climat. Il est donc conseillé de bien se rapprocher du fournisseur ou d'un conseiller avant une installation. Les mouvements d'air sur les végétaux **doivent être faibles** (< 1m/s).

Destratificateur/brasseur à 400€ l'unité, hypothèse de 2 unités pour la serre, 7 ans amortissement	0,31 €/m <sup>2</sup> /an
Consommation électrique (155w), marche pendant 6h/j, 0,16€.kWh	0,30€/m <sup>2</sup> /an
Installation, câblage. (2 personnes, 2 jours) et petits matériels	0,25€/m <sup>2</sup> /an

Des fiches CEE existent sur les moteurs synchrones et asynchrones (Agri\_ut\_101 et Agri\_ut\_102) et une autre sur les destratificateurs est en cours d'élaboration.

## Projet APAF\_Synthèse technique

Développement de stratégies sous abris froids afin de s'affranchir des phytosanitaires de synthèse tout en conservant la qualité des cultures

### *P4: Bilans technico-économiques des systèmes*

## Produits supplémentaires des systèmes testés

Système évalué en maraîchage pour la saison 2023.

- Simulation sur un tunnel de 320m<sup>2</sup>
- 1 serre témoin et une serre équipée avec filets *insect-proof* et 2 brasseurs d'air.
- Succession de 2 cultures (salades et aubergines)
- Charges de protection des cultures identiques entre les 2 serres
- Les serres disposent du même équipement de gestion climatique.



Tab.6 Schéma de culture du système maraîcher en 2023, rendement par rapport au témoin indiqué entre parenthèse.

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Salades (-13%)											
									Aubergines (+17%)		

Dans l'analyse, seule la différence de charges et de produits entre les deux systèmes est présentée. **Les coûts fixes**, égaux par ailleurs, **ne sont pas pris en compte dans ces calculs**. En effet, les modalités n'ont pas permis de modifier les pratiques (lâchers d'auxiliaires, traitement, ...)

## Bilan technico-économique

<b>Différence de charges/an</b>	<b>- 1,07 €/m<sup>2</sup></b>
Insect-proof	- 0,21 €/m <sup>2</sup> /an
Brasseurs	- 0,86 €/m <sup>2</sup> /an
<b>Différence de produits/an</b>	<b>+ 1,26 €/m<sup>2</sup></b>
Rendement sur aubergine (+ 17% de rendement)	+2,4 €/m <sup>2</sup> /an
Rendement sur salade (-13% de laitue commercialisable)	-1,14 €/m <sup>2</sup> /an
<b>Différence totale</b>	<b>+ 0,19 €/m<sup>2</sup></b>



Dans l'exemple proposé, le système avec brasseur et filet permet d'avoir un bilan légèrement positif avec un gain de 0,19€/m<sup>2</sup>.

### Remarque générale sur les résultats du projets

Les modèles d'étude du projet ont été des serres monochapelles. Sur ces structures, il y a environ 2,5 fois plus de surfaces de parois (latérales et toit) que de surface au sol. L'effet d'inertie apporté par le sol n'est donc pas dominant sur le climat global de la serre. Les échanges convectifs (vent) avec l'extérieur sont majoritaires. Les résultats sur l'effet des ventilateurs sur le climat de la serre auraient été probablement différents dans le cas d'une multichapelle.

L'équipe projet remercie l'ensemble des fournisseurs ayant participé au projet et reste disponible pour tout renseignement.

David VUILLERMET ASTREDHOR [David.vuillermet@astredhor.fr](mailto:David.vuillermet@astredhor.fr)  
 Pierre LASNE CTIFL [pierre.lasne@ctifl.fr](mailto:pierre.lasne@ctifl.fr)  
 Etienne CHANTOISEAU INSTITUT AGRO [etienne.chantoiseau@agrocampus-ouest.fr](mailto:etienne.chantoiseau@agrocampus-ouest.fr)  
 Vincent STAUFFER AGRITHERMIC [v.stauffer@agrithermic.fr](mailto:v.stauffer@agrithermic.fr)  
 Lucas MAUREL XENILABS [lucas.maurel@xenilabs.com](mailto:lucas.maurel@xenilabs.com)

Retrouver ces fiches  
en ligne

