Liste des abréviations

AVS : Active Ventilation System

CATE : Comité d'Action Technique et Economique

CO_2 : Dioxyde de carbone

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légume

CEE : Certificat d'Economie Energétique

DH : Déficit hydrique

Ha : Hectar

HR : Humidité relative

IR : Infra-rouge

Kg : Kilogramme

Moy : Moyenne

R/H : Capacité de renouvellement d'air de la serre selon la puissance des ventilateur

VPD : Déficit de pression de vapeur

CO_2 : Dioxyde de carbone

m^2 : mètre carré

KWh/m^2 : Kilo Watt heure par mètre carré

t : tonne

T°C : Température en degré Celsius

VPD : Déficit de pression de vapeur

°C : degré Celcius

€ : euro

Table des matières

Table des matières 6
1. Introduction 8
1. Contexte et enjeux : 8
2. Le projet : EFFICIENCE ENERGIE SERRE 8
3. Les actions du projet : 9
4. Problématique : 9
2. Etat de l'art des cultures maraîchères sous serre et leur interaction avec le climat local. 10
1. Interaction entre la culture et le climat 10
3. Effet de la température sur la plante : 12
1. Effet de l'humidité sur la plante 13
4. Maintien du climat dans la serre 13
1. Chauffage : 13
2. Refroidissement : 14
5. Taux de $C0^2$: 14
6. L'éclairage : 15
7. Gestion sanitaire : 15
8. Pilotage du climat par ordinateur 15
1. Synthèse des effets et interactions des paramètres climatiques 16
9. Partie technico-économique 16
10. Matériels et méthodes : 18
1. Types de serres : 18
2. Conduite des cultures 18
11. Résultats 19
1. Gestion de la température 19
2. Teneur en CO2 : 21
3. Consommations en énergie thermique et électrique : 22
4. Comportement des différentes variétés dans les deux outils : 23
12. Discussion 25
13. Conclusions et perspectives 26
14. Bibliographie 27

Tables des graphiques :

Graphique 1: Ecart de température mesurée entre la tête des plantes et les gaines de distribution de l'air (Serre semi-fermée 7 R/h19

Graphique 2 : Ecart de température mesurée entre la tête des plantes et les gaines de distribution de l'air (Serre déshumidifiée 1,8 R/h)19

Graphique 3 : Température moyenne sous 24 pendant la période de conduite19

Graphique 4: Moyenne des écarts de température entre la tête et la gaine pour l'ensemble des serre sur la période de conduite 2017-201819

Graphique 5 : Ecart d'humidité relative mesuré entre la tête des plantes et les gaines de distribution de l'air (Serre semi-fermée 7 R/h)20

Graphique 6 : Ecart d'humidité relative mesuré entre la tête des plantes et les gaines de distribution de l'air (Serre déshumidifiée 1,8 R/h)20

Graphique 7: Moyenne des écarts % de HR des serres pour toute la période de conduite21

Graphique 12 : Teneur en CO221

Graphique 13 : Consommation électrique22

Graphique 8 : Floraison de la variété Plaisance en période de conduite 2017-201823

Graphique 9 : Charge de la variété Plaisance pour toute la période de conduite 2017-201823

Graphique 11 a : Poids moyen des fruits de la variété Plaisance23

Graphique 14 : Comparaison des écarts de température entre la serre 7 R/H et la 1,8 R/H sur la période de conduite 201832

Graphique 15 : Comparaison des écarts de % de HR entre la serre 7 R/H et la 1,8 R/H sur la période de conduite 201832

Graphique 16: Comparaison des écarts de températures entre tête de plante et gaine pour la serre 7 R/H pour les conduites de 2017 et 201832

Graphique 17 : Comparaison des écarts de % HR entre tête de plante et gaine pour la serre 7 R/H pour les conduites de 2017 et 201833

Graphique 18: Hygrométrie moyenne sous 24 H33

Graphique 19 : Croissance de la variété Plaisance pour toute la période de conduite 201833

Graphique 20 : Floraison de la variété Clodano pour la période de conduite 201834

Graphique 21 : Différence de rendement cumulée en Kg/m^2 selon le mois34

Graphique 22 : Consommations électriques de la serre semi-fermée et température moyenne extérieure35

Graphique 23 : Consommation énergétique serre 7R/H35

Graphique 24: Evolution des importations françaises de tomates par origines (Douane française, C. Hutin , CTIFL)36

Graphique 25 : Production de tomates en Europe pour le marché du frais (source : Eurostat moy 2015-16-17 et C. Hutin , CTIFL)36

Graphique 26 : Estimation de la consommation d'énergie en fonction des performances des performances thermiques de la paroi37

1. Introduction

Ce stage s'inscrit dans le projet de recherche « EFFICIENCE ÉNERGIE SERRE » qui vise à améliorer le système de production de tomates sous serre hors-sol en optimisant l'efficience énergétique. La main d'œuvre reste le premier poste de charge et représente 33 % du coût de revient pour une tomate grappe (CERAFEL France ,2016). Avec 24 % du coût de production, l'énergie représente le second poste, tous segments de tomate confondus (Enquête Ctifl, 2016).

Sous serre, la consommation d'énergie est très forte, entraînant des coûts importants, il est alors nécessaire de rechercher une meilleure efficience énergétique afin de maintenir ou d'améliorer les performances agronomiques et la qualité du produit tout en réduisant ou en stabilisant la consommation d'énergie.

1. Contexte et enjeux :

La Bretagne, région située au nord-ouest de la France est la région la plus productrice de fruits et légumes frais*(CERAFEL)*. Le légume frais représentait en 2007 6,7% de la production agricole bretonne et entre 2000 et 2007 la tomate est devenu le légume le plus important représentant 70% du chiffre d'affaire des légumes frais.
La culture de tomate occupe une surface de 530 ha en Bretagne pour une production de l'ordre de 200 000 t, représentant 40 % de la production nationale.

La quasi-totalité de la production est réalisée par des cultures hors-sol précoces conduites sous serre verre, 470 ha contre 60 ha pour les cultures en sol sous abris plastique *(France Agrimer 2017)*. La main d'œuvre reste le premier poste de charge et représente 33 % du coût de revient pour une tomate grappe *(CERAFEL France, 2016),* avec 24 % du coût de production, l'énergie représente le second poste, tous segments de tomate confondus *(Enquête Ctifl, 2016).*

La consommation d'énergie est très forte, entraînant donc des coûts importants, il serait alors nécessaire de trouver des moyens pour limiter cette consommation sans compromettre la production et surtout la qualité.

2. Le projet : EFFICIENCE ENERGIE SERRE

Pour répondre aux demandes des agriculteurs, le CATE a mis en place le projet « EFFICIENCE ENERGIE SERRE » sur 3 ans (2018-2021). Ce projet a débuté en 2018 et les objectifs sont d'acquérir des références technico-économiques pour les producteurs, sur la façon d'optimiser le climat et la conduite des plantes dans des serres de nouvelle génération.

Un premier objectif de ce projet vise à améliorer l'efficience énergétique en évaluant les potentialités de serres semi-fermées de nouvelle génération et d'équipements permettant une déshumidification des serres.
Pour y parvenir, les conduites devront améliorer la précocité, le potentiel de production, la qualité des tomates, tout en réduisant la pression sanitaire et en limitant les consommations énergétiques. Ce modèle de serre est déjà bien développé dans le sud de la France, sur le plan national on a 65 ha de serres semi-fermées soit 6% du parc national (1082 ha). De plus nous avons 28 ha de serres déshumidifiées soit 2,6 %.
L'un des objectifs du projet sera de vérifier son intérêt dans les conditions climatiques bretonnes.

Ces nouvelles techniques de gestion du climat doivent, à terme, permettre d'accroître la compétitivité de la filière, et de gagner des parts de marché pour certains segments de production. Un autre objectif du projet est de conduire une culture éclairée dans une serre

semi-fermée, en cherchant une production à contre saison (hiver) pour des segments peu couverts par les productions étrangères (Espagne, Maroc).
Elles pourront permettre d'élargir le calendrier de production et d'améliorer la productivité ainsi que la qualité des produits tout en minimisant le coût énergétique.

3. Les actions du projet :

Comparaison de systèmes de Production en serre semi-fermée et déshumidification par échange thermique avec l'air extérieur en serre traditionnelle.

Ce projet a plusieurs partenaires techniques hors financement:

-Ctifl: stations de Carquefou et de Balandran qui travaillent sur les mêmes problématiques mais pour des conditions pouvant être différentes de celles du Nord-Ouest.

-Vegenov: analyse sensorielle pour les essais réalisés sous éclairage.

Partenaires privés:

-Constructeur de la serre (Hortined)
-Gestion du climat (Priva)
-Eclairage (Philips, Agrolux)
-Maisons semencières

Partenaires professionnels:

-Organisations de producteurs: Savéol, Prince de Bretagne(Sica de Saint-pol-de-Léon et UCPT), Solarenn
-AOPn tomates et concombres de France

Stations d'expérimentation belges:

-Sainte Catherine et Meerle
-Hoogstraten

4. Problématique :

Le CATE a investi en 2016 dans une nouvelle serre expérimentale dans le but de tester un modèle de serre et des équipements pouvant être adaptés aux conditions climatiques bretonnes et de rechercher une meilleure efficience énergétique pour une production de tomates.
La problématique du stage, concerne l'optimisation du climat sous serre semi-fermée ainsi que la déshumidification en serre traditionnelle.

Pour répondre à cette problématique, ce rapport présentera 3 aspects :

Le premier aspect sera une étude climatique (Hygrométrie, Température de l'air, Interaction climat/culture) par comparaison de données acquises dans les différentes serres par un ordinateur climatique de la société PRIVA.

Le second aspect sera une étude des résultats agronomiques obtenus dans les différents modèles de serre :

- Variables mesurées : Kg/m², nombre de grappes/m², poids moyen des fruits et nombre de fruit par grappe.

Le troisième aspect sera une étude technico-économique visant à comparer les modèles de serres.

2. Etat de l'art des cultures maraîchères sous serre et leur interaction avec le climat local.

Le phénotype d'une plante est le résultat de l'interaction entre son génotype, son environnement et les techniques culturales. Pour obtenir des produits de qualité et des rendements intéressants, les producteurs jouent sur ces 3 leviers. Les sélectionneurs choisissent le cultivar le plus intéressant selon la qualité désirée, il est ensuite placé dans un environnement où les conditions sont les plus propices à son développement et permettent une production maximale.
La serre est un système de gestion du climat qui permet d'apporter les meilleures conditions de croissance, de développement ainsi que de rentabilité pour une culture donnée en jouant sur les principaux paramètres que sont : la lumière, la température, l'hygrométrie, et la nutrition minérale et carbonée.

La serriculture est un mode de culture qui regroupe différents types de production ou culture sous serre de plantes horticoles (légumes et plantes ornementales) principalement.
Le choix du type de serre dépend en premier lieu du coût d'investissement et du type de culture désirée mais aussi du climat de la région considérée. Il existe une grande variété de serres, mais deux types se distinguent : les serres multi-chapelles à paroi en verre et les abris plastiques, le plus souvent des tunnels ou des abris hauts *(RA 2010)*.

Dans cette analyse, nous traiterons du climat dans les serres, de sa gestion et son impact sur le développement des végétaux et des ravageurs. Puis, nous étudierons les conséquences des différences observées dans le climat au sein d'une serre dite traditionnelle avec déshumidification et sans déshumidification, et avec une serre semi-fermée. La dernière possédant un corridor climatique sans cooling Pad.

1. Interaction entre la culture et le climat

1. L'effet de serre :

Le climat dans les serres est dépendant du climat extérieur. Le principal facteur est le rayonnement solaire puisqu'il permet d'augmenter la température à l'intérieur par effet de serre (schéma). Les courtes longueurs d'ondes émises par le soleil arrivent au niveau des parois de la serre. Une partie des rayons incidents est réfléchie par les parois, la grande majorité est transmise à l'intérieur de la serre. Parmi les rayons transmis certains sont absorbés par les constituants de la serre (les plantes et le sol principalement).

Une partie de ce rayon absorbé peut être réémis sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde (infra-rouge). 50% des infra-rouge (IR) sont absorbés par le verre puis réémis vers l'extérieur, les autres sont piégés dans la serre. Les rayons IR sont porteurs d'énergie thermique, piégés dans la serre ils permettent d'augmenter la température. Une surface soumise au rayonnement peut avoir une température jusqu'à 10°C au-dessus de la température de l'air *(de Parceveaux et Hubert, 2007).*

Cet effet de serre est positif l'hiver dans les régions froides, par exemple dans le nord-ouest de l'Europe, mais a un aspect négatif dans les régions chaudes (nécessité d'évacuer la chaleur en excès). Les échanges de chaleur dans une serre peuvent se faire par différents modes.
Soit par rayonnement comme vu précédemment, soit par convection ou conduction.

La conduction et la convection sont les deux modes principaux. La conduction est le seul mode de propagation de chaleur au sein d'un solide, la transmission de chaleur se fait par vibration atomique ou par des électrons libres *(Urban, La production sous serre, tome 1 ; Gestion du climat 2010).* Dans la serre ces échanges peuvent se faire entre la surface du sol et les couches profondes, entre le sol et l'air, mais aussi entre l'air et les parois en verre ce qui occasionne des déperditions de chaleur. Ceci entraîne soit une diminution de la température de la serre en cas de mauvais temps, ou au contraire, une augmentation en cas de forte température à l'extérieur.

La convection est un mode d'échange qui se fait essentiellement par des fluides en mouvement. La convection existe sous deux formes, par changement de phase ou sans changement. Les échanges peuvent être accélérés par ventilation sans changement de phase (air-air), ou avec l'eau par un circuit toujours sans changement (eau-eau). Dans la serre lorsque les ouvrants sont ouverts, l'air chaud et humide de la serre montent et sont évacués. Il se créé alors une dépression qui permet à un air extérieur plus sec d'entrer. La convection par changement de phase (eau-vapeur) peut se faire selon deux modes, par évapotranspiration des plantes ou par condensation sur les parois lorsqu'il fait froid.

Le rayonnement solaire total reçu par la plante va jouer différents rôles. Une partie du rayonnement reçu (20%) par la plante va être réfléchi directement. Le reste va être absorbé par la plante. La majeure partie de cette énergie (60%) va contribuer à la transpiration de la plante qui est une activité nécessaire pour son bon développement. Une plus petite part (15%) va permettre l'élévation de la température de la plante. Enfin, les (5%) restants sont utilisés par la plante pour réaliser des réactions biologiques et premièrement la photosynthèse *(WACQUANT, 1995)*

2. Hygrométrie:

L'humidité de la serre dépend fortement des conditions extérieures (précipitation, froid, vent…) et de la quantité d'eau transpirée par les plantes. Une forte humidité dans la serre peut créer de la condensation sur les parois, ce qui a pour effet de diminuer la transmission lumineuse et d'augmenter le risque de maladies fongiques. Mais cela participe aussi à l'effet de serre puisque l'eau a une capacité d'absorption des IR plus importante que l'air.

L'humidité de l'air peut s'exprimer de différentes manières. Tout d'abord, on peut parler d'humidité relative (HR) qui correspond au rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air et la pression de vapeur saturante. Elle s'exprime donc en pourcentage. Une valeur de 100% d'HR correspond donc à un air qui arrive à son point de rosée et donc l'eau va commencer à condenser. Ce point de rosée étant fonction de la température, on utilise plus couramment une autre grandeur : le déficit hydrique (DH).

Le DH représente la quantité d'eau que peut encore absorber l'air avant d'atteindre la saturation. Il s'exprime en grammes d'eau par kilogramme d'air sec. Enfin, la dernière grandeur utilisée pour parler d'humidité est le déficit de pression vapeur (VPD). De la même manière que le DH, le VPD représente la différence entre la pression vapeur de l'air à saturation et la pression vapeur mesurée. Il s'exprime donc en kiloPascal (PRENGER et al, 2001).
Le déficit de pression de vapeur (VPD) est la différence entre la pression de vapeur saturante à la température du végétal et la pression de vapeur d'eau de l'air ambiant.

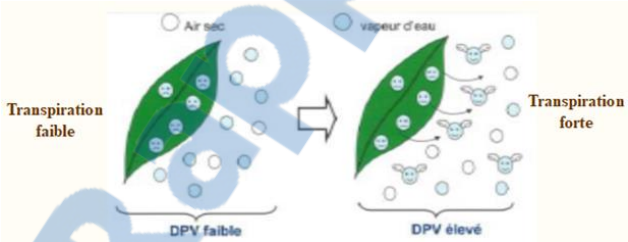


Figure 1 : Le déficit de pression de vapeur (CTIFL)

VPD faible : l'air est chargé en eau, il n'y a pas de transfert de vapeur d'eau des feuilles vers l'air

VPD élevé : l'air est sec, il y a transfert de vapeur d'eau des feuilles vers l'air et évapotranspiration des plantes.

On peut favoriser l'ouverture des stomates à 100% en maintenant un DH adapté.

Le déficit de pression de vapeur pour la tomate se situe entre 0,4 et 1KPa. Il peut être estimé à partir d'une mesure de la température de la plante et de l'air.

Pour obtenir une augmentation de VPD de 0,1 KPa	
Augmentation de la température	+0,25 °C
Diminution de l'humidité relative	-4%
Augmenter le déficit hydrique	+0,7 g/Kg
Augmenter la température en la plante	+ 0,7 °C

Tableau 1 : Déficit de pression de vapeur

Rapport-Gratuit.com

Grandeur	Unité	Valeur au point de rosée de l'air
Humidité relative (HR)	%	100
Déficit hydrique (DH)	G d'eau/Kg d'air sec	0
Déficit de pression de vapeur (VPD)	KPa	0

Tableau 2 : Les grandeurs permettant de caractériser le taux d'humidité (source)

3. Effet de la température sur la plante :

La température influence le cycle de développement de la plante aussi appelé thermopériodicité, une influence selon un rythme qui peut être annuel (saison) ou journalier (nuit plus fraîche que le jour). De nombreux processus physiologiques dont la photosynthèse, la croissance cellulaire, la respiration et la transpiration sont dépendants de la température. Toutes les réactions biologiques possèdent un optimum thermique, leur vitesse augmente jusqu'à un optimum puis diminue. Cependant, les optimums sont complexes à définir, notamment du fait qu'ils dépendent d'interactions entre plusieurs facteurs. Par exemple, une photosynthèse importante dépend d'un rayonnement élevé, d'une forte concentration en CO_2 1000ppm et d'une température comprise entre 20-25°C dans le cas de la tomate.

Au-delà de la température optimale il y a une dégradation de l'appareil photosynthétique, la photosynthèse diminue d'autant plus que la température est élevée et le temps d'exposition est important. L'optimum de température pour la photosynthèse pourrait être donc défini comme la température maximale pour laquelle la photosynthèse peut être maintenue à un niveau constant pendant un temps «relativement long» (Loveless, 1983).
En culture de tomates, le contrôle de la température a un effet sur la vigueur de la plante, sur sa vitesse de croissance et sur le rapport entre la production de parties végétatives et reproductives. *(Turcotte et coll., 2008a).*

La température a également un fort impact sur le temps de maturation des fruits : plus elle est élevée, et plus les fruits pourront être récoltés rapidement, mais ceux-ci seront alors d'un calibre plus faible. De plus, ces derniers sont plus sensibles à des élévations de température quand ils sont proches de la maturité. La température est donc très importante au niveau des fruits et des méristèmes mais semble l'être beaucoup moins pour le reste de la plante *(ADAMS et al, 2001)*. Il est également important de maîtriser la différence de température entre le jour et la nuit.

En effet, même si la tomate a besoin de températures assez élevées pour se développer et produire en quantité, elle va avoir tendance à se développer végétativement dans des conditions de températures linéaires.

Le développement du fruit est déterminé pour une large part en fonction du niveau de température: La vitesse de croissance d'un fruit de tomate est plus rapide avec des températures élevées au détriment de la croissance végétative de la plante.

Température moyenne 24h en °C	Nombre de jour entre floraison et récolte	Nombre de degrés jours
17	71	1207
20	60	1200
23	52	1196

Tableau 3 : Optimum de croissance et qualité

En général, il n'y a pas d'avantage à maintenir la température de la serre trop élevée pendant la nuit, car plus la température nocturne est haute, plus le taux de respiration est élevé.
Un écart de température entre le jour et la nuit favorise le transfert des assimilats vers les fruits et permet d'assurer un bon grossissement de ceux-ci. Il faudra cependant adapter la

température en seconde partie de nuit au rayonnement reçu par la plante durant la période diurne.

1. Effet de l'humidité sur la plante

La tomate se développe correctement sur une large gamme d'humidité de l'air mais celle-ci reste néanmoins très importante à prendre en compte. Lorsque les plantes sont jeunes, on va préférer une humidité relative modérée car l'humidité favorise le développement des feuilles. Le développement des feuilles, quant à lui, va permettre à la plante de transpirer davantage, et de ce fait l'humidité ambiante risque d'augmenter. Il convient donc d'avoir une bonne maîtrise de l'humidité pour ne pas tomber dans ce cercle vicieux. De manière générale, en pleine période de culture, on évitera d'avoir des déficits hydriques supérieurs à 10g d'eau/kg d'air sec ou inférieurs à 2g d'eau/kg d'air sec *(WACQUANT, 1995).*

Une humidité relative élevée associée à une atmosphère enrichie en CO_2 a pour résultat d'augmenter la conductance stomatique des plantes. Ceci peut être utilisé dans le but de stimuler la photosynthèse, la croissance des plants de tomates et donc leur rendement à travers une augmentation de la matière sèche des fruits. Cependant, pour améliorer ce rendement de manière continue et stable, il faut avoir une bonne maîtrise de la transpiration des plantes. En effet, une humidité plus élevée a tendance à réduire la transpiration de la plante ce qui peut entraîner un problème au niveau de l'assimilation et la distribution des nutriments. D'un autre côté, une augmentation de l'humidité permet d'améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau par la plante. Une humidité relative de 80% semble être optimale *(SUZUKI, 2015).*

Comme nous l'avons vu plus haut, il faut surtout tenir compte du déficit d'humidité, la plante pouvant supporter une humidité plus élevée lorsque la température s'élève.
Des opérations d'effeuillage sont à réaliser selon le stade de développement, pour affecter les produits de la photosynthèse aux fruits et non aux feuilles, mais aussi pour maintenir un taux de transpiration permettant une maîtrise hygrométrique dans le milieu.

4. Maintien du climat dans la serre

1. Chauffage :

Le chauffage est nécessaire en région tempérée pour le bon fonctionnement de la photosynthèse. Ce besoin est d'autant plus important en période hivernale où la température extérieure peut être négative et d'autant plus affecter celle de serre par convection.
On observe alors une augmentation de l'humidité qui s'accompagne de condensation au niveau des parois et d'un ralentissement des processus physiologiques qui peuvent conduire à la mort de la plante. Comme la majorité des plantes, le développement de la tomate est directement dépendant de la température ambiante. Originaire d'une région assez chaude (Amérique du Sud), la tomate possède un zéro de végétation assez élevé, de 12°C. De ce fait, il est indispensable de chauffer en hiver pour assurer la survie de la plante en climat tempéré. L'utilisation d'écrans thermique dans les serres est accès répandu, ces écrans permettent de conserver la chaleur et d'économiser 20%-30% d'énergie sur le temps de culture.

Le système radiatif ou thermosiphon est majoritairement utilisé pour la culture, il est installé au plus près des plantes, en partie basse de la plante par les rails et au niveau de la végétation par des forcas. Ce chauffage permet un chauffage par convection avec l'air mais aussi un chauffage par rayonnement vers les plantes.
Le système radiatif est plus efficace que le convectif, car au plus près des plantes, mais aussi par une limitation des pertes.
Les consignes de chauffage sont décidées par l'utilisateur qui peut ainsi indiquer des températures minimale et maximale.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2. Refroidissement :

L'effet de serre est responsable d'un échauffement de la serre en été. Pour limiter cet échauffement, il faut ventiler la serre, ce qui favorise le déplacement d'air chaud et son renouvellement par de l'air extérieur plus frais.
La ventilation est le moyen le plus simple pour refroidir une serre *(Feuilloley et al., 1994)* et peut se faire par plusieurs moyens, dont l'ouverture d'ouvrants ou par des systèmes qui permettent le forçage d'entrée d'air extérieur. La ventilation peut alors être statique ou dynamique.

Une ventilation statique, est une ventilation dans laquelle l'air est renouvelé très lentement selon plusieurs facteurs tel que: la présence ou non d'ouvrants latéraux qui favorisent la circulation d'air, du taux d'ouverture du faîtage, de l'orientation des ouvrants par rapport au vent et enfin de la hauteur de la serre, car plus la serre est haute meilleure sera la ventilation.

La ventilation dynamique, se fait par des ventilateurs placés dans la serre, qui permettent le brassage d'air entrant par les ouvrants. Dans certaines serres, on retrouve en plus de la ventilation dynamique, un système insect-proof qui empêche l'entrée d'insectes. Ces serres fonctionnent en surpression, l'air est injecté dans la serre *(Urban, La production sous serre tome 1 ; La gestion du climat, 2010)*.

Des écrans d'ombrage peuvent être utilisés pour ombrager la serre et limiter l'augmentation de la température à l'intérieur. Les écrans d'ombrage peuvent réduire la température jusqu'à 6°C en comparaison avec une serre qui n'en n'utilise pas *(NGMA, 1996).*

5. Taux de $C0^2$:

Le CO_2, élément indispensable à la réalisation de la photosynthèse, a des effets significatifs, sur la croissance *(Nederhoff and Graaf 1993).* L'air ambiant contient naturellement 400 ppm de CO_2, dans la serre un enrichissement est nécessaire pour augmenter la production.
Lorsque l'intensité lumineuse et la température sont suffisamment élevées pour ne pas être limitantes, le taux de photosynthèse augmente linéairement avec la concentration de CO_2.

Pour beaucoup de plantes, la concentration maximum d'absorption de CO_2 peut atteindre à peu près 1000ppm, la photosynthèse est alors pratiquement à son maximum.
Le taux d'assimilation du CO_2 d'une plante de tomate est maximal à des concentrations ambiantes de 1000ppm, dans ce cas on observe un gain de précocité et une augmentation de la vigueur.
Le maintien, tout au long de l'année, tout au long de la journée d'un taux de $C0_2$ de 750 ppm permettrait d'augmenter d'1/3 la production annuelle de tomate *(Vermeulen et VanDe Beek, 1992)*. Pour la culture en serre, la rentabilité de l'utilisation de CO_2 dépend de la source et du coût. L'apport de CO_2 peut provenir de plusieurs sources, combustion directe de propane ou gaz naturel, CO_2 liquide (Au CATE le CO_2 est apporté sous les deux formes, récupération sur fumées et complément sous forme liquide).

Les premiers bénéfices d'une serre semi fermée sont une augmentation du taux de CO_2, une réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires et une diminution de la consommation énergétique *(Campen, J.B. & Kempkes, F.L.K., 2011).* Sous un climat tempéré, une serre fermée permet une réduction de consommation d'énergie fossile de 25 à 35%, comparativement à une serre traditionnelle. Avec un niveau de rayonnement élevé, le climat d'une serre fermée se caractérise par une teneur élevée en CO_2, une humidité élevée de l'air, un meilleur contrôle de la température avec cependant un gradient sur le plan vertical.
Une augmentation annuelle de la production de 10 à 20 % paraît réaliste.

L'augmentation de rendement est principalement obtenue par une amélioration de la photosynthèse en raison du maintien de la teneur en CO_2. Dans le futur, il faudra réduire au minimum le recours aux combustibles fossiles et améliorer le contrôle du processus de production. Les serres fermées et semi-fermées s'intègrent parfaitement dans cette tendance car elles permettent un meilleur contrôle du climat et des niveaux de production plus élevés,

combinés avec un moindre recours aux énergies fossiles *(A. De Gelder, J.A.Dieleman, G.P.A.Bot & L.F.M.Marcelis).*

Les serres semi-fermées de nouvelle génération peuvent être conçues dans un but de meilleure efficience énergétique. Les leviers techniques permettant le maintien du niveau de production tout en réduisant la consommation en énergie de 40 % sont l'utilisation intensive des écrans thermiques combinée avec un meilleur contrôle de l'humidité. L'utilisation maximale de la capacité d'intégration de la culture implique une forte relation entre la somme quotidienne de rayonnement et les températures moyennes diurnes, et le maintien d'une grande différence entre les températures diurnes et nocturnes les jours ensoleillés. Ceci permet de réduire l'apport d'énergie et la vitesse de ventilation *(A. De Gelder, E.H.Poot, J.A.Dieleman, Zwart de H.F)*.

Cultiver à une hygrométrie élevée, atteint par exemple par brumisation, permet de réduire la ventilation en raison d'une augmentation de l'enthalpie de l'air. L'apport de CO_2 dans ces conditions de ventilation réduite permet de maintenir un taux plus constant conduit à une concentration plus élevée *(A. De Gelder, E.H.Poot, J.A.Dieleman, Zwart de H.F).*

6. L'éclairage :

Les serres semi-fermées permettent un meilleur contrôle du climat comparées aux serres conventionnelles. Pour assurer la rentabilité économique de ces nouveaux outils, une augmentation de la productivité est nécessaire. Dans le nord de l'Europe, l'éclairage artificiel se développe afin d'augmenter la productivité et d'améliorer la qualité du produit.
Ceci répond à une demande du marché pour une production toute l'année et permet également plus de pérenniser l'emploi. L'utilisation de LED entre les rangs de plantes en plus de lampes à vapeur de sodium en hauteur peut permettre d'améliorer l'efficience de l'éclairage et de la consommation énergétique *(Heuvelink,E. & Gonzalez-Real, M.M., 2008).*

7. Gestion sanitaire :

La Serre est un environnement clos, ayant un climat spécifique favorable à la maîtrise des maladies et des ravageurs par un recours aux méthodes de la Protection Biologique Intégrée.
A l'inverse, le système serre exerce une très grosse pression sur les maladies du fait, des conditions climatiques qui favorisent certaines maladies et un développement plus rapide des ravageurs. Les principaux ravageurs rencontrés sont: aleurode, pucerons, cochenille, acariens, thrips, bronzée et *tuta absoluta*.

Le principe de la protection biologique réside dans la réduction des effectifs d'un animal ou d'une plante considéré comme nuisible, par l'utilisation d'agent(s) naturel(s) antagonistes (auxiliaires). Des lâchers inondatifs d'auxiliaires peuvent être faits: Encarsia et Macrolophus utilisés pour lutter contre les mouches blanches en serre.
Dans la protection intégrée, le but n'est pas de supprimer complètement les populations d'espèces nuisibles, mais de les maintenir en dessous d'un seuil acceptable. On peut aussi utiliser des produits phytosanitaires à condition que ceux-ci soient compatibles avec les auxiliaires et les bourdons utilisés pour la pollinisation.

8. Pilotage du climat par ordinateur

La gestion du climat vise à maintenir simultanément l'ensemble des facteurs climatiques au voisinage de leurs consignes respectives tout en respectant certaines règles imposées par l'utilisateur (serriste).

Des niveaux de gestion de la serre ont été mis en évidence. Il existe 3 niveaux *(Baille et Gary 1989; Jaffrin et al ..; 1991)* : Le niveau 0 est un niveau de mesure des paramètres et du maintien des consignes, le niveau 1, assuré par un logiciel, permet la gestion en temps réel des capteurs et des actionneurs qui sont impliqués dans la croissance et le développement à

court terme des plantes. Le niveau 2 permet une optimisation bio-économique et de l'aide à la décision stratégique, l'objectif est de fournir des solutions considérées comme proches de l'optimum économique en fonction du type de serre et d'équipement des plantes cultivées ainsi que de la main d'œuvre du prix actuel et anticipé des produits.

1. Synthèse des effets et interactions des paramètres climatiques

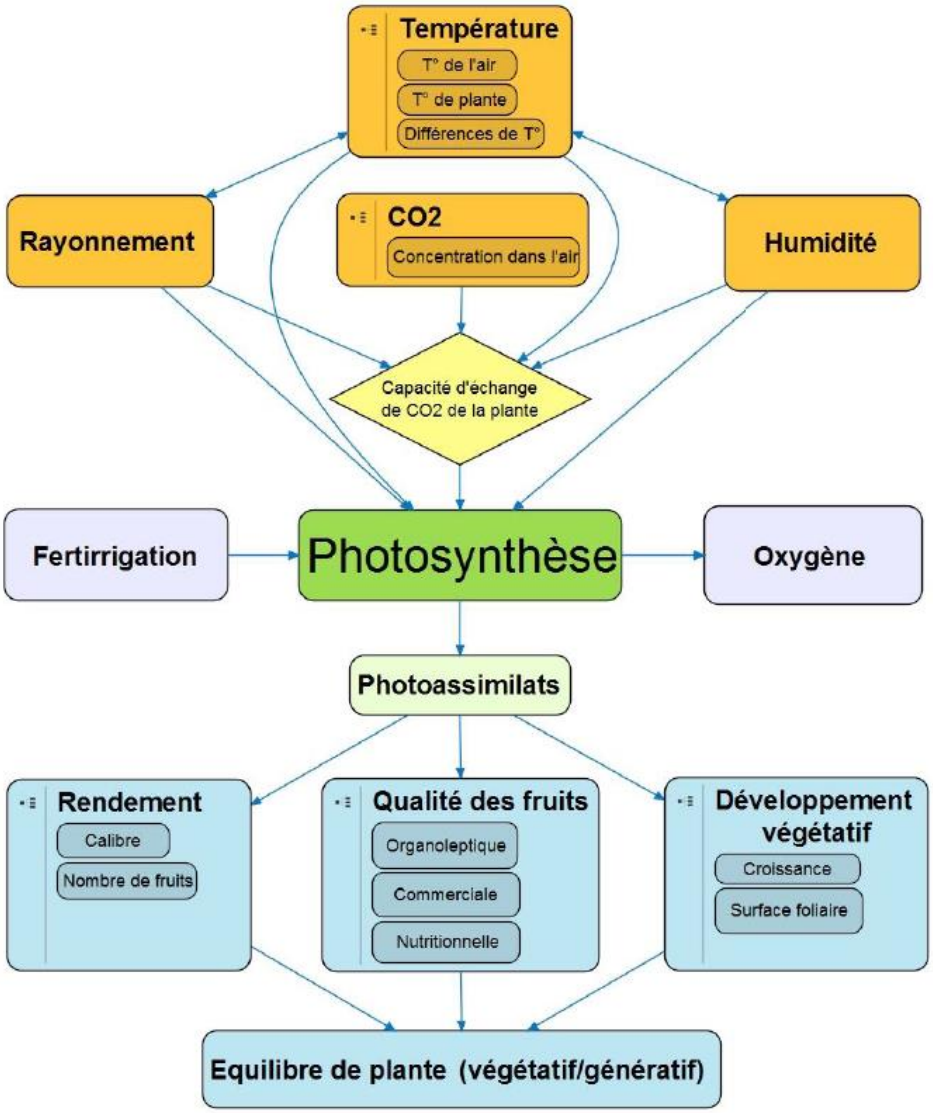


Figure 2 : Synthèse des effets et interactions des paramètres climatiques source *(Thybaud BRAZEAU, 2015)*

9. Partie technico-économique

La culture sous serre est le troisième poste de consommation d'énergie dans le secteur agricole après les bâtiments d'élevage *(Agrest, 2014)* et le second poste de coût après la main d'œuvre. Dans ce système la consommation et le coût énergétique sont plus élevés en termes de chauffage, dans les régions du nord. Dans celles-ci, le gaz naturel est la source d'énergie la plus utilisée. En Bretagne, il alimente 89 % (77 % pour la moyenne nationale) de la surface, sur un total de 470 ha de serres chauffées et plantées en tomate *(Enquête Ctifl, 2016).*
Entre 2005 et 2011, le prix de l'énergie a augmenté de 65 % pour le gaz naturel et de 145 % pour le fioul lourd *(Enquête Ctifl, décembre 2012).* L'impact sur les entreprises est conséquent, puisque le coût de l'énergie pour une culture de tomate est passé de 8,50 € en 2004 à une

moyenne de 11,60 € par m2 de serre en 2013, soit une progression de 36 % *(Cerfrance, 2014)*.

Avec une production française insuffisante et qui ne cesse de baisser depuis 2008, notamment pour les 2 principaux bassins de production que sont le Bassin Ouest et le Bassin Sud-Ouest. Leur production passe respectivement de 200000 t à 17000 t avec un pic à 250000 en 2016 et de 290000 t à 17000 t. Dans cette même période on a constaté une très forte importation de tomates provenant du Maroc, qui passe de 190000 (t) à 300000 (t). Un marché intérieur fortement dépendant des imports (Graphique 24). La France se classe 5ème producteur de tomate en EUROPE avec un peu plus de 500 milles (t) de tomates produites en moyenne entre 2015 et 2017, derrière la Pologne et les Pays Bas avec près de 800 milles t mais devant la Belgique (Graphique 25) *(CTILF Balandran, Octobre 2018).*
La tomate est produite pour deux marchés distincts : la tomate de marché pour la consommation en frais et la tomate d'industrie pour la transformation et la conserve.

Pour être concurrentiel et rendre la serre plus efficiente, de nombreuses installations sont à mettre en place pour limiter les pertes et mieux utiliser l'énergie disponible. Dans ces installations, on retrouve les écrans thermiques latéraux, des doubles écrans thermiques, le chauffage par le système Open Buffer, des systèmes de récupération de la chaleur et un ordinateur climatique avec intégration de la température. Mais certains de ces équipements s'avèrent onéreux (Table 11), des aides ont donc été mis en place pour permettre leur financement par les producteurs. Il s'agit du Certificat d'économie d'énergie (CEE). Le CEE mis en place par la loi POPE (Programme fixant les Orientations de la Politique Énergétique) le 13 Juillet 2005, permet d'inciter et de promouvoir des technologies performantes que les serristes ont du mal à installer du fait d'un coût très élevé *(CTIFL CEE 2018, LÉGUME DE FRANCE).*

La vulgarisation de ces technologies dans les régions du nord, pourrait permettre l'augmentation de production sous serre et notamment en contre saison et ainsi les régions du nord pourraient rivaliser en terme de quantité avec les régions du sud (Maroc, Espagne) grandes productrices de tomate où l'ensoleillement est beaucoup plus important avec un coût de main d'œuvre est bien inférieur.

Beaucoup de serres chauffées au gaz naturel sont actuellement équipées de cogénérations. Celle-ci permet à partir d'un moteur de produire de la chaleur et de l'électricité. L'électricité est revendue sur le réseau et la chaleur est récupérée pour chauffer les cultures. Le CO2 peut être également récupéré sur les cogénérations pour enrichir la serre (Figure 3). La cogénération possède donc plusieurs avantages : la diminution des coûts de production, un intérêt environnemental, de plus on observe aussi un gain de précocité et de productivité avec ces systèmes. La cogénération est la seconde source de production d'énergie bretonne *(Agriculteurs de Bretagne)*.

Un gain d'énergie peut aussi se faire au niveau de l'isolation des parois de la serre, plus la paroi est isolée et moins il faut la chauffer (Graphique 26), par contre il faut trouver un compris avec l'entrée de lumière. Car plus la couche de verre à travers est épaisse, moins de rayonnement arrivent sur la plante et nous avons une diminution de la photosynthèse.

10. Matériels et méthodes :

1. Types de serres :

Serre traditionnelle avec déshumidification (1,8 R/H)	Serre semi-fermée ModulAir (7 R/H)
-Déshumidification avec un échangeur climatique simple flux Van Dijk par chapelle (échange possible de 13m^3/h/m^2 soit 1,8 R/h). -Distribution de l'air par une simple gaine de 470 mm par chapelle. -Ouverture traditionnelle en toiture -Double écran thermique (Luxous 1347 FR) et ombrage (Harmony 2315 O FR)	-Corridor climatique sans PAD cooling, mais avec fog. Ouvrant guillotine dans le corridor et ouvrants de surpression dans la serre avec Insect-proof. -Echange à 50 m^3/h/m^2 soit 7 R/h -Aérothermes placés en hauteur dans le corridor climatique -Double écran thermique (Luxous 1347 FR) et ombrage (Harmony 2315 O FR)

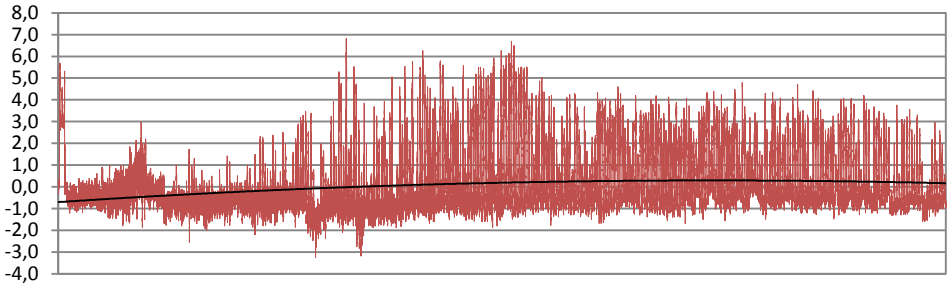
2. Conduite des cultures

	Serre semi-fermée et serre avec déshumidification	Serre témoin sans déshumidification
Variétés de type grappe	Plaisance (De Ruiter) Luminance (De Ruiter) Confiance/DRTH6639 (De Ruiter) Clodano (Syngenta)	Luminance (De Ruiter) Clodano (Syngenta)
Semis des porte-greffes	27/09/17	06/11/17
Semis des variétés	29/09/17	08/11/17
Greffage	18/10/17	29/11/17
Repiquage	30/10/17	11/12/17
Pré-plantation	**23/11/17**	**05/01/18**
Plantation définitive	18/12/17	02/02/18
Densités	2.33 → 3.50 plants/m^2 (augmentation en semaines 08)	2.47 → 3.12 plants/m^2 (augmentation en semaines 08)
Substrats	laine de roche GRODAN Grotop Master (L 120 x l 15 x H 10)	fibres de coco Palmeco Technical Generation (L 75 x l 20 x H 11)
Taille des bouquets	5 fruits jusqu'en sem.16 - puis 6 fruits jusqu'à sem.24 - puis de nouveau 5 fruits	5 fruits jusqu'à sem.13 - puis 6 fruits jusqu'à sem.24 - puis de nouveau 5 fruits
Récolte	**Du 22/02/18 au 05/11/18**	**Du 26/03/18 au 27/11/18**

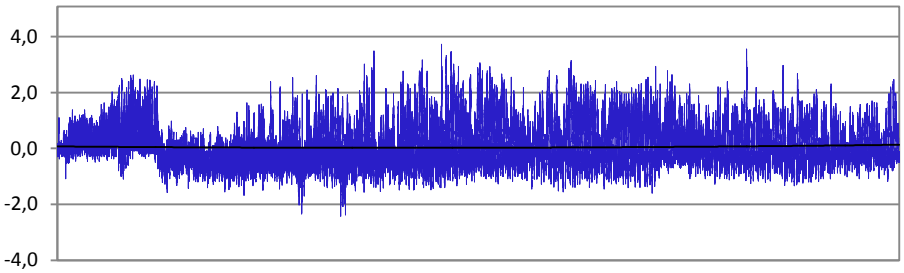
Tableau 2: Conduite des cultures sous serres

11. Résultats

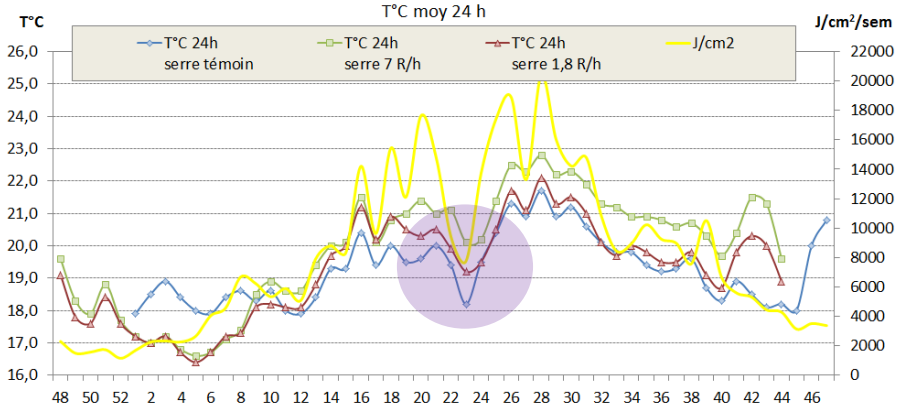
1. Gestion de la température



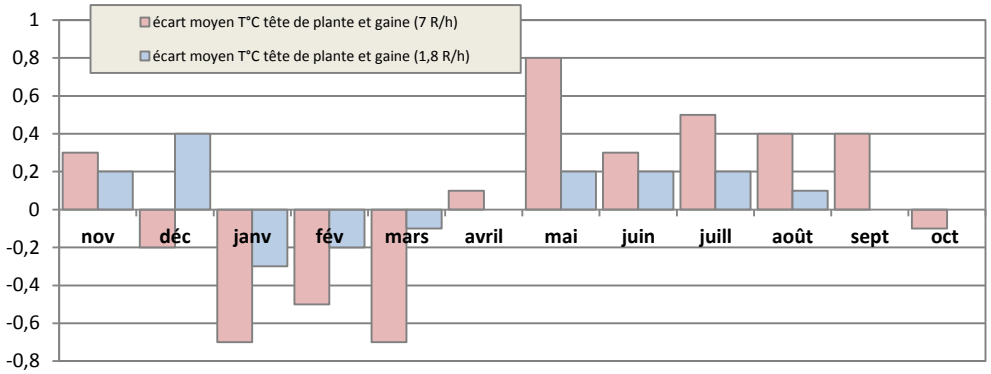
Graphique 1: Ecart de température mesurée entre la tête des plantes et les gaines de distribution de l'air (Serre semi-fermée 7 R/h)



Graphique 2 : Ecart de température mesurée entre la tête des plantes et les gaines de distribution de l'air (Serre déshumidifiée 1,8 R/h)



Graphique 3 : Température moyenne sous 24 pendant la période de conduite



Graphique 4: Moyenne des écarts de température entre la tête et la gaine pour l'ensemble des serre sur la période de conduite 2017-2018

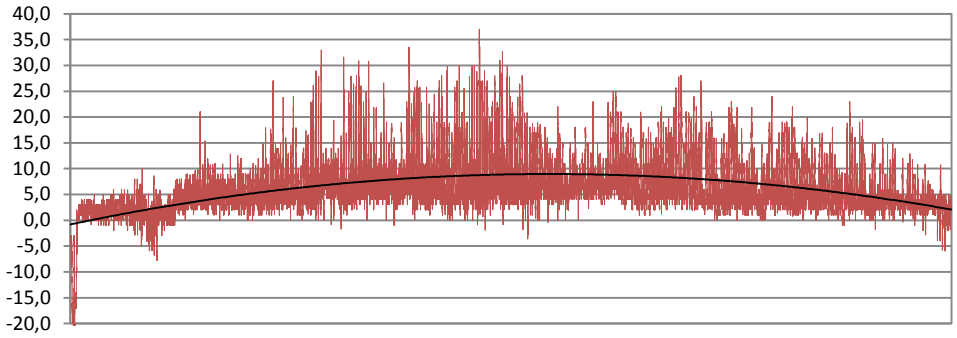
Les mesures des températures sont comparables sur la première partie de saison entre la serre semi-fermée et la serre traditionnelle (1,8R/H). En cours de saison, à partir de la semaine 20, on constate une température moyenne plus élevée réalisée sur 24 heures qui est supérieure de 0,6 °C dans la serre semi-fermée (serre 7 R/h) avec un niveau de rayonnement bas (semaines 22 et 23)(Graphique 3). Cette température moyenne élevée demeure acceptable lorsque le rayonnement lumineux est important, à condition de maintenir une teneur également élevée en CO_2.

Lors de cette période l'écart de température entre la tête et le bas du plant est en moyenne négatif. Cet écart est compris entre 0,4 et 0,7 °C, et la différence maximale est de 2 °C (Graphique 4). Dans cette serre un chauffage est réalisé en partie basse par des gaines et des rails ce qui permet le maintien d'une température plus élevée en bas. Pour la conduite traditionnelle avec déshumidificateur, pour la même période cet écart est compris entre 0 et 0,2 (Graphique 5) avec une différence maximale de 2 °C (Graphique 3). L'écart est plus faible dans cette serre car le réchauffement de l'air ce fait par un système AVS qui permet une répartition assez homogène de l'air.

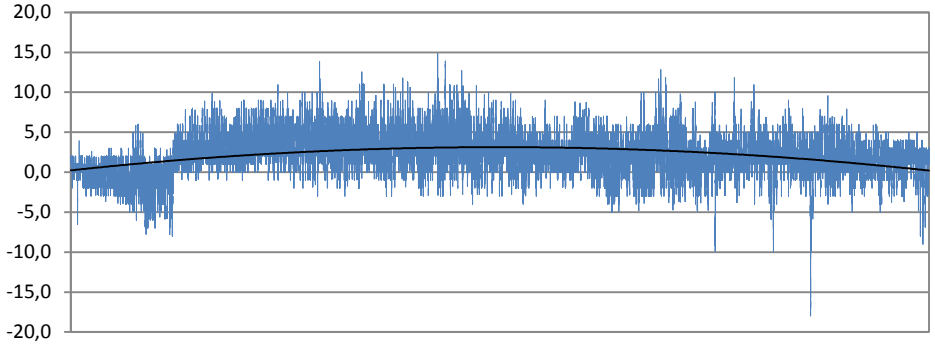
De plus on observe que pour la serre conduite en déshumidification et pour la serre témoin, les températures moyennes réalisées sont identiques sur l'ensemble de la saison (Graphique 3).

Le climat de la serre semi-fermée se caractérise par un gradient élevé de température sur le plan vertical durant la période de refroidissement de la serre (Avril à Septembre).
La différence maximale constatée peut être de 6 °C (Graphique 1) durant cette période, avec une moyenne se situant entre 0,1 et 0,8 °C (Graphique 4) Dans la serre conduite avec déshumidification (serre 1,8 R/h), cet écart reste faible, avec une différence maximale de 3 °C et une moyenne se situant entre 0 et 0,2 °C sur la même période (Graphique 3).

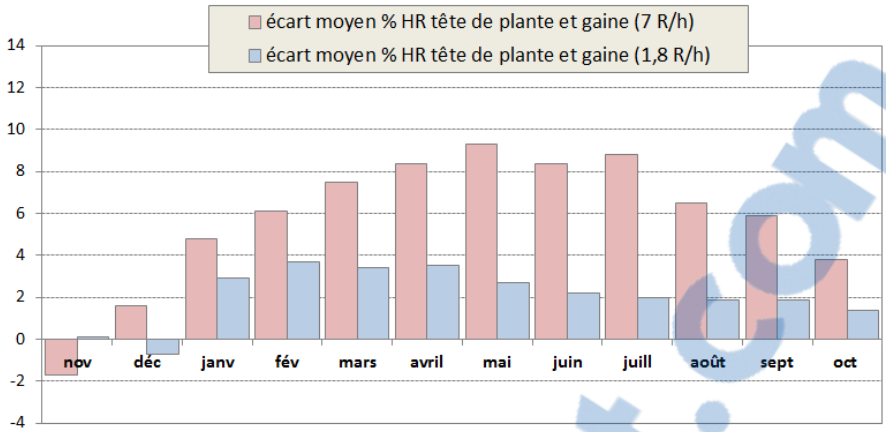
1. Gestion de l'hygrométrie



Graphique 5 : Ecart d'humidité relative mesuré entre la tête des plantes et les gaines de distribution de l'air (Serre semi-fermée 7 R/h)



Graphique 6 : Ecart d'humidité relative mesuré entre la tête des plantes et les gaines de distribution de l'air (Serre déshumidifiée 1,8 R/h)



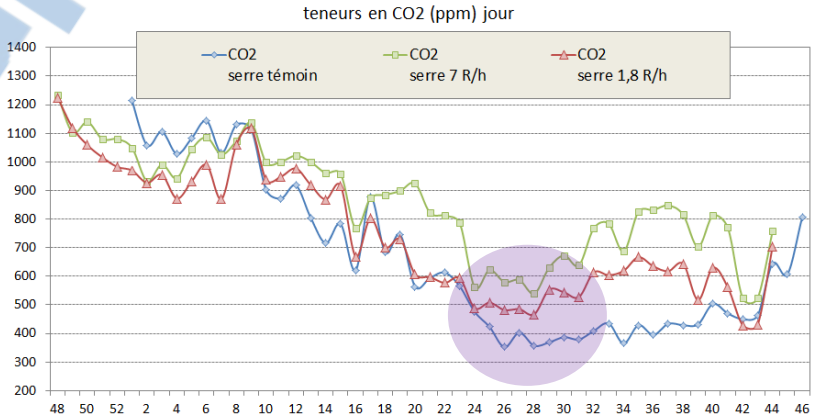
Graphique 7: Moyenne des écarts % de HR des serres pour toute la période de conduite

Dans la serre semi fermée (7 R/H) on a une humidité plus importante en tête de plant et des écarts d'humidité relative très importants pour un maximum de 35 %(Graphique 5) par rapport à la serre traditionnelle où on constate une faible différence d'écart entre la tête et le bas du plant et une humidité relative assez constante au cours de la conduite pour un écart maximum de 15 % (Graphique 5).

Dans la serre semi-fermée, la déshumidification est très efficace avec un gradient moyen d'humidité relative sur un plan vertical compris entre 4 et 9 %(Graphique 7).Dans le système de serre semi-fermée, l'admission d'air extérieur ce fait par l'ouvrant guillotine qui permet au besoin d'augmenter ou de diminuer rapidement cette entrée d'air et donc l'humidité relative distribuer par les gaines à proximité des tiges et des fruits. La capacité de déshumidification est plus importante dans la serre semi-fermée en raison d'une capacité plus élevée de renouvellement de l'air.
Dans la serre traditionnelle équipée d'une déshumidification, le gradient d'humidité relative sur le plan vertical, entre les gaines de distribution d'air et la tête des plantes, varie entre 2 et 3 % en moyenne sur l'ensemble de la saison (Graphique 7).

Malgré une capacité de refroidissement plus importante on a des difficultés à gérer correctement le climat d'une serre semi-fermée par temps doux et peu lumineux.
On se retrouve avec une température moyenne et une hygrométrie trop élevées en tête de plante qui entraine la perte de vigueur de la plante et une mauvaise sortie de bouquets ainsi que des brûlures en tête de plante. Lorsqu'il n'est pas possible de diminuer la température moyenne sur 24 heures en dessous de 20 °C pour un rayonnement moyen de 1 000 J/cm^2/jour, il devient nécessaire d'aérer la serre.

2. Teneur en CO2 :

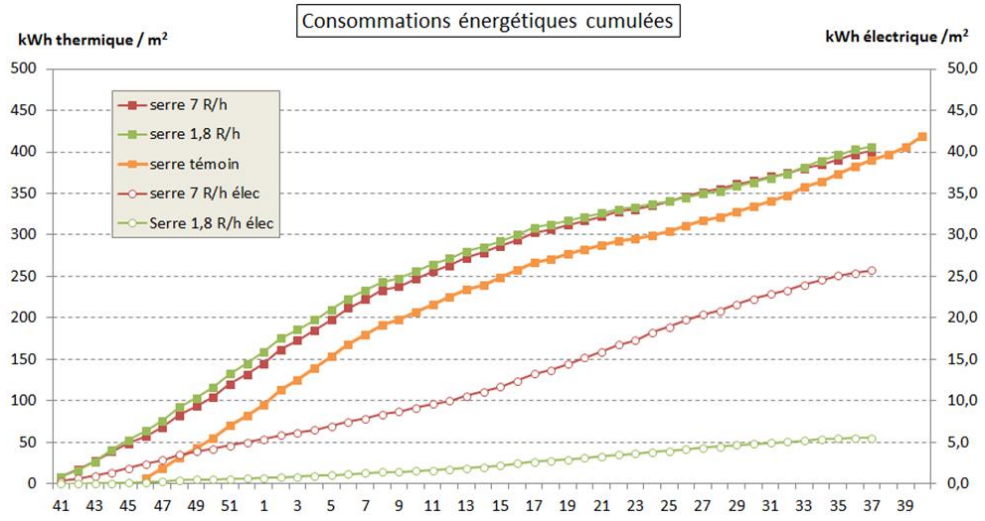


Graphique 8 : Teneur en CO2

Rapport-Gratuit.com

Les teneurs en CO_2 sont identiques dans les trois serres jusqu'en Juin semaine 17.
A partir de cette période, la teneur en CO_2 maintenue dans la serre semi-fermée est plus élevée et est comprise entre 700 et 900 ppm de la semaine 18 à la semaine 23, alors qu'elle se situe environ à 600 ppm sur la même période pour les autres serres. Les teneurs chutent dans le compartiment semi-fermé de la semaine 24 à la semaine 31 en raison d'un arrêt des approvisionnements en CO_2 liquide. La serre semi-fermée a besoin d'un enrichissement en $C0_2$ pour optimiser la photosynthèse des plantes. En fin de saison, la teneur maintenue dans la serre semi-fermée et dans la serre conduite en déshumidification sont de nouveau plus élevées, la serre témoin n'étant pas enrichie en CO_2 liquide. L'apport réalisé en CO_2 liquide dans la serre semi-fermée et dans la serre déshumidifiée est estimé à 20 kg/m^2 sur l'ensemble de l'année.

3. Consommations en énergie thermique et électrique :



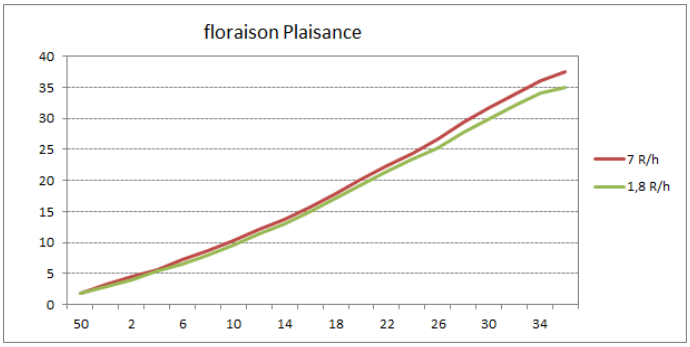
Graphique 9 : Consommation en énergie thermique et électrique

En fin de saison, les consommations énergétiques sont 406 kWh/m^2 pour la serre déshumidifiée (1,8 R/h) et 401 kWh/m^2 pour la serre semi-fermée (Graphique 9). Les consommations électriques sont respectivement de 25,7 et 5,5 kWh/m^2 pour la serre semi-fermée et pour la serre déshumidifiée. Elles sont plus élevées qu'en 2017 (19,3 et 3,9 kWh/m^2), mais avec un calendrier de culture plus long et un total de 9 semaines d'utilisation supplémentaire.

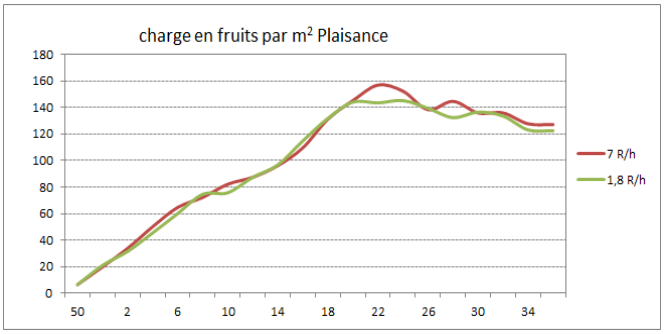
Dans la serre semi-fermée, la consommation électrique est essentiellement liée au fonctionnement des ventilateurs et des aérothermes pour une utilisation en mode chauffage durant la période hivernale et refroidissement en été. Cette consommation est corrélée à la température extérieure moyenne constatée (Graphique 23)

4. Comportement des différentes variétés dans les deux outils :

1. Comportement des plants dans les serres :



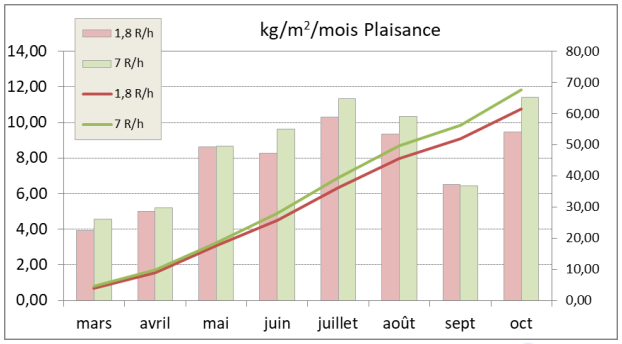
Graphique 10 : Floraison de la variété Plaisance en période de conduite 2017-2018



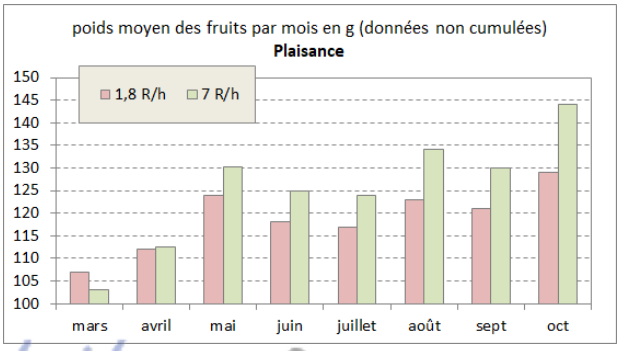
Graphique 11 : Charge de la variété Plaisance pour toute la période de conduite 2017-2018

Pour les quatre variétés étudiées on constante une floraison et une charge des fruits plus rapide et plus importante pour la serre semi-fermée (7 R/H) par rapport à la serre traditionnelle (1,8 R/H) (graphique 10 et 11). La charge des fruits est plus précoce et plus importante pour la serre semi-fermée surtout entre les semaines 18 à 28 (Mai et Juin).
Le maintien d'une température moyenne plus élevée dans cette serre permet d'augmenter le nombre total de bouquets sur les différentes variétés. Par rapport à la serre conduite en déshumidification, la différence moyenne est de 2,0 bouquets par plante en fin de saison, avec un écart moindre pour la variété Confiance (Tableau 10) qui a une vitesse de floraison plus faible que les trois autres variétés. **(**Dans cette conduite, on observe un équilibre de plante nettement plus génératif, en raison d'une forte déshumidification et d'un écart de température jour/nuit élevé.

2. Résultats agronomiques :



Graphique 12 : Rendement de la variété Plaisance en Kg/m^2 /mois



Graphique 13 a : Poids moyen des fruits de la variété Plaisance

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Les différentes analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statbox. Une analyse de variance ANOVA est effectuée à travers les étapes suivantes :

- analyse de la normalité des résidus (test de Pearson)
- analyse de l'indépendance des résidus (méthode de GRUBBS)
- analyse de l'homogénéité des résidus
- analyse de la variance des échantillons
- test post-hoc de comparaison de moyennes de Newman-Keuls

Les postulats de normalité et d'homogénéité des résidus sont vérifiés avec des p-values 0.323 et 0.592

TEST DE NEWMAN-KEULS - SEUIL 5% : variable rendement

F1	LIBELLES	MOYENNES (Kg/m^2)	GROUPES HOMOGENES	
2.0	semi-fermée	68,606	A	
1.0	déshumidification	62,225		B

Tableau 3 : Facteur serre : Moyenne Kg/m2 en fin de culture

F2 : Variété	LIBELLES	MOYENNES (Kg/m^2)	GROUPES HOMOGENES	
4.0	confiance	67,927	A	
2.0	luminance	65,528		B
1.0	plaisance	64,564		B
3.0	clodano	63,644		B

Tableau 4: Facteur variété : Moyenne Kg/m2 en fin de culture

ANOVA à 2 facteurs avec modèle additif cumulé du poids par mètre carré Kg/m^2

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	944,345	47	20,092				
VAR.FACTEUR 1 serre	488,62	1	488,62	82,039	0		
VAR.FACTEUR 2 variété	122,183	3	40,728	6,838	0,00102		
VAR.INTER F1*2	10,711	3	3,57	0,599	0,62333		
VAR.BLOCS	114,373	5	22,875	3,841	0,00712		
VAR.RESIDUELLE 1	208,458	35	5,956			2,44	3,73%

Tableau 5 : Analyse de variance ANOVA

Les postulats de normalité et d'homogénéité des résidus sont vérifiés avec des p-valeurs 0,784 et 0,481

TEST DE NEWMAN-KEULS - SEUIL 5% ; variable poids moyen

F1	LIBELLES	MOYENNES (g)	GROUPES HOMOGENES	
2.0	semi-fermée	133,712	A	
1.0	déshumidification	127,045		B

Tableau 6 : Facteur serre : Moyenne (g) en fin de culture

F2	LIBELLES	MOYENNES (g)	GROUPES HOMOGENES		
4.0	confiance	139,551	A		
2.0	luminance	130,288		B	
3.0	clodano	128,151		B	
1.0	plaisance	123,524			C

Tableau 7 : Facteur variété : Moyenne (g) en fin de culture

ANOVA à 2 facteurs avec modèle additif cumulé du poids par mètre carré Kg/m^2

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	2851,302	47	60,666				
VAR.FACTEUR 1	533,42	1	533,42	43,637	0		
VAR.FACTEUR 2	1633,099	3	544,366	44,533	0		
VAR.INTER F1*2	49,748	3	16,583	1,357	0,27149		
VAR.BLOCS	207,196	5	41,439	3,39	0,01336		
VAR.RESIDUELLE 1	427,839	35	12,224			3,496	2,68%

Tableau 8 : Analyse de variance ANOVA

A l'aide du test de Newman-Keuls, on remarque que la serre semi-fermée se distingue de façon significative de la serre traditionnelle avec déshumidification. Une différence de rendement plus élevé de 6,4Kg/m^{2}pour la semi-fermée (Tableau 3) ainsi que des fruits plus lourd de 7 g en moyenne (Tableau 6).
En ce qui concerne les variétés, Confiance se distingue significativement des autres avec un rendement plus élevé en Kg/m^2 (Tableau 4), de plus elle se distingue aussi avec Plaisance par un poids moyen de fruit plus élevé. Plaisance a également des fruits présentant un poids plus faibles que les variétés Luminance et Clodano. (Tableau 7).

Dans l'analyse de variance on remarque nous avons une forte corrélation entre les effets serre et variété avec une probabilité de 0.62333 soit la production est plus importante pour ces variété dans la serre semi-fermée par rapport à la traditionnelle. Par contre il n'y a pas d'effet bloc probabilité très faible proba : 0.00712, de plus le coefficient de variation de la variance résiduelle est très faible 3,73% (Tableau 5).

12. Discussion

Le climat de la serre semi-fermée se caractérise par un fort gradient de température sur le plan vertical, une température moyenne plus élevée sur les mois d'été et un écart jour-nuit également plus élevé. On constate une difficulté à gérer correctement le climat dans la serre semi-fermée par temps doux et peu lumineux. L'enrichissement et le maintien d'une teneur plus élevée en CO_2 permettent d'améliorer le calibre des fruits sur les mois d'été. La précocité et la productivité finale se retrouvent améliorées dans la serre semi-fermée (7 R/H) par rapport à la serre traditionnelle (1,8 R/H). Le gain est réalisée à la fois par le calibre des fruits (gain de poids moyen de 6 à 10 g par fruit suivant les variétés) et par une meilleure vitesse de floraison du fait de températures moyennes plus élevées.

Le gain final de productivité se situe entre 9 et 13 % suivant les variétés, mais ce gain ne peut être réalisé qu'en seconde partie de saison dans une période peu favorable sur le plan commercial et pour une tomate récoltée en grappes. Il reste insuffisant pour assurer une bonne rentabilité de l'outil. On relève une différence importante d'adaptation du matériel végétal pour une conduite en serre semi-fermée. La variété Confiance montre une bonne adaptation, contrairement à Plaisance et Clodano, pour lesquelles on enregistre une perte notable de qualité sur les mois d'été.
Il est nécessaire d'utiliser des variétés supportant une température moyenne élevée, des écarts jour/nuit élevés et des variations d'humidité en tête de plante. Dans ce type de conduite avec un fort brassage d'air, les plantes montrent également une plus grande sensibilité à l'oïdium. Dans ces conditions, la variété Confiance présente l'avantage d'être très hautement tolérante à l'oïdium par rapport aux autres variétés qui sont toutes les trois sensibles. Les plantes ne montrent par contre aucune sensibilité au botrytis dans ce type la serre semi-fermée.

13. Conclusions et perspectives

Les objectifs de ce stage étaient l'étude du climat dans différentes types de serre par comparaison (semi-fermée, serre traditionnelle sans déshumidification et serre traditionnelle avec déshumidification) à fin d'évaluer les potentialités des serres semi-fermées de nouvelle génération et d'équipements permettant une déshumidification, tout en améliorant l'efficience énergétique ainsi que la rentabilité de ces serres dans le climat breton. Des différences de températures et d'hygrométries ont été observées dans les serres, ces climats différents ont un impact sur la qualité et la quantité des fruits produits. Les plants mis dans la serre semi-fermée poussent plus rapidement et ont une charge du fruit plus importante que dans la serre traditionnelle avec déshumidification et donc une rentabilité plus forte.

Ayant des climats différents, la gestion de ceux-ci est différente, on constate une difficulté à gérer correctement le climat dans la serre semi-fermée par temps doux et peu lumineux. Mais surtout, lorsque l'apport de CO_2 n'est pas réalisé dans la serre semi-fermée celle-ci perd l'un de ses intérêts majeurs qui est d'augmenter la productivité des plantes. La serre semi-fermée conserve cependant un autre intérêt majeur qui est une meilleure gestion sanitaire. De plus dans un contexte de réduction ou d'arrêt d'utilisation des produits chimiques de synthèse, la serre semi-fermée est un outil qui peut permettre sous différents climats de diminuer et de retarder la pression exercée par certains ravageurs et de se protéger également contre des ravageurs émergents.

Amortissement de la serre (par rapport à une serre équipée en déshumidification)	3,00 €/m^2
Electricité (25 kWh/m^2)	2,15 €/m^2
CO_2 liquide supplémentaire (100 à 150 t/ha)	2,00 €/m^2
Charges supplémentaires	7,15 €/m^2
Gain moyen de rendement	6,40 kg/m^2
Prix de vente nécessaire du rendement supplémentaire pour atteindre le point d'équilibre (par kg en tomate grappes)	1,10 €

Table 9 : Coût de fonctionnement de fonctionnement d'une serre semi-fermée

Les avantages conférés par ce modèle de serre, à la fois sur les plans sanitaire et agronomique, sont plus facilement valorisables pour des conditions de production plus contraignantes en été et la rentabilité ne peut être obtenue que par une diminution significative des coûts de production, notamment au niveau énergétique.

Ce stage était le premier réaliser dans le projet « EFFICIENCE ENERGIE SERRE » et ne s'inscrivait que dans l'une des actions de celui-ci, des recherches restent donc à être menées notamment sur le couplage d'une conduite sous serre semi-fermée avec un éclairage artificiel pour une production à contre saison. Cela nécessiterait une évaluation de la consommation de l'énergie électrique de l'éclairage, en plus du chauffage et de la ventilation pour en voir l'efficience et la rentabilité par rapport à une serre semi-fermée classique afin de produire davantage durant la période d'hiver et de pouvoir être concurrentiel avec les pays du sud (Maroc et Espagne).

14. Bibliographie

ADAMS S.R., COCKSHULL K.E., CAVE C.R.J. (2001). Effect of Temperature on the Growth and Development of Tomato Fruits. *Annals of Botany*, 88, pp. 869-877

ALICE RICHARD ET ARIANE GRYSEY (08/2018) CTIFL :LES CERTIFICATION D'ECONOMIE D'ENERGIE : UN OUTIL DE FINANCEMENT POUR LES PRODUCTEURS

ARIANE GRYSEY ET JEAN-PHILIPPE BOSC (04/2018) INNOVATION TECHNIQUES EN CULTURE VEGETALE SOUS SERRE

ARIANE GRYSEY ET ERIC BRAJEUL (18/03/2009) LA MAÎTRISE DE L'ENERGIE EN CULTURE SOUS SERRE

CHRISTIAN HUTIN (04/2018). CULTURE SOUS SERRES : LES TENDANCES DU MARCHE ET DE LA CONSOMMATION

De Parceveaux S., Huber L. (2007) Bioclimatologie - concepts et applications. Edition quæ, 336p.

De Parceveaux S. (1990) Dictionnaire encyclopédique d'agrométéorologie, éditeurs : CILF - INRA -
Météo France, 323p

E.J VAN HENTEN, J.BONTSEMA AND G.VAN STRATEN (1997) INPROVING THE EFFICIENCY OF GREENHOUSE CLIMATE CONTROL AN OPTIMAL CONTROL APPROACH

ERIC BRAJEUL, ARIANE GRYSEY ET SERGE LE QUILLEC (18/03/2009) GESTION DE L'ENERGIE EN SERRE MARAICHERE CHAUFFEE

KESHAVE TIMOLSENA (2014) : USING SEMI-CLOSED GREENHOUSE TO MAXIMISING PRODUCTION WHILE MINIMISING INPUTS AND WASTE

PINOIT C. (15/09/2015) Mémoire de fin d'études : ANALYSE DU CLIMAT DANS LES SERRES DE CONCOMBRE COMPARAISON ENTRE SITE EXPERIMENTAL ET SITE DE PRODUCTION. Spécialité : Production et Technologie du Végétal Soutenu à Agrocampus Ouest à Angers le 15/09/2015.

PRENGER J., LING P. (2001). Greenhouse Condensation Control : Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD), *The Ohio State University Extension, Food Agricultural and Biological Engineering Series*, AEX-804-01, pp. 1-4

RAPHAEL TISIOT (04 /10/2018). ETAT DES LIEUX DES SERRES SEMI-FERMEES EN FRANCE ET TRAVAUX DE CTIFL

SERGE LE QUILLEC (2015) CTIFL EVALUATION DE LA SERRE SEMI-FERMEE ULTRACLIMA (Kubo) EN CULTURE DE TOMATE HORS-SOL

SUZUKI M., UMEDA H., MATSUO S., KAWASAKI Y., AHN D., HAMAMOTO H., IWASAKI Y. (2015). Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production, *Scientia Horticulturae*, 187, pp. 44–49

THYBAUD BRAZEAU (11/09/2015) Mémoire de fin d'études : IMPACTS ET ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE DE DIFFERENTES CONDUITES CLIMATIQUES EN TOMATE HORS-SOL SOUS SERRE. Spécialité : Horticulture.
Soutenu le 11/09/15 à Agrocampus Ouest à Angers

VINCENT TRUFFAULT (04/10/2018). LE PILOTAGE DES CULTURES ET DES TECHNOLOGIES PAR L'INTEGRATION DE CAPTEURS ET DE MODELES DE PHYSIOLOGIE VEGETALE

Sitographie :

FRANCE AGRIMER (2014). Les filières de fruits et légumes : Données 2013.
http://www.franceagrimer.fr/content/download/36560/335092/file/chiffres%20cl%C3%A9s%20FL%202013.pdf

Tableau 1: Conduite des cultures sous serres18

Tableau 2 : Facteur serre : Moyenne Kg/m2 en fin de culture24

Tableau 3: Facteur variété : Moyenne Kg/m2 en fin de culture24

Tableau 4 : Analyse de variance ANOVA24

Tableau 5 : Facteur serre : Moyenne (g) en fin de culture24

Tableau 6 : Facteur variété : Moyenne (g) en fin de culture24

Tableau 7 : Analyse de variance ANOVA25

Tableau 8: Résultats agronomiques de la saison 201834

Figure 1 : Le déficit de pression de vapeur 12

Figure 2 : Déficit de pression de vapeur 13

Figure 3 : Synthèse des effets et interactions des paramètres climatiques source *(Thybaud BRAZEAU, 2015)* . 17

Figure 4 : Fonctionnement de la cogénération (www.agriculteurs-de-bretagne.bzh) 37

Table 1 : Coût de fonctionnement de fonctionnement d'une serre semi-fermée26
*Table 2: Coût d'équipement d'une serre semi-fermée (source : A.Richard et A. Grisey, CTILF)*36

RÉSUMÉ

Le but de ce stage était d'évaluer l'efficience énergétique d'une serre semi-fermée de nouvelle génération permettant la déshumidification ainsi que leur l'intérêt technico-économique de cette culture en Bretagne.
Le stage c'est effectué dans les serres expérimentales du CATE à Saint-Pol-de-Léon. Pour cela une étude comparative du climat a été faite dans les 3 types de serres. Une serre traditionnelle sans déshumidification (témoin), une serre traditionnelle avec déshumidificateur à simple flux de marque Van DijK et dans une serre semi-fermée possédant un corridor climatique. La température, l'hygrométrie ont été mesurées dans ces serres par des capteurs de la marque PRIVA, ainsi que la quantité de CO_2.

Les mesures de température pour le début de saison sont comparables entre la serre semi-fermée et la serre traditionnelle avec déshumidification, par contre à partir du milieu de saison jusqu'à fin de saison on observe un écart notamment entre la tête du plant et la gaine. Dans la serre semi fermée, on a une humidité plus importante en tête de plant et des écarts d'humidité relative très importants par rapport à la serre traditionnelle où on constate une faible différence d'écart et une l'humidité relative assez constante au cours de la conduite. On observe que dans la serre semi-fermée, on a un gain de précocité des variétés étudiées, une production plus importante, par Kg/m^2 ainsi qu'en poids du fruit.

L'intérêt d'une culture sous serre semi-fermée en Bretagne est pour l'instant limité, on constate des coûts de fonctionnement assez important particulièrement pour le chauffage et le refroidissement, des prix de ventes assez bas. Ce modèle de serre ne serait pas pour l'instant rentable pour les producteurs bretons.
Des améliorations restent encore à être apportées sur l'efficience énergétique et sur le coût des charges.

mots-clés : Tomate, Serre, Gestion du Climat, Serre semi-fermée, Consommation d'énergie, CATE, Culture hors-sol, NTEPPE NYEMB, Jean Alcyon.

ABSTRACT

The aim of this internship was to evaluate the energy efficiency of a semi-closed greenhouse of new generation allowing dehumidification as well as the technical and economic interest of this culture in Brittany. The internship was made in the experimental greenhouses of the CATE in Saint-Pol-de-Léon. For this purpose a comparative study of the climate was made in the 3 types of greenhouses. A traditional greenhouse without dehumidification (control), a traditional greenhouse with Van Dijk single flow dehumidifier and a semi-enclosed greenhouse with a climate corridor. Temperature and humidity were measured in these greenhouses by PRIVA climate computer, as well as the amount of CO2.

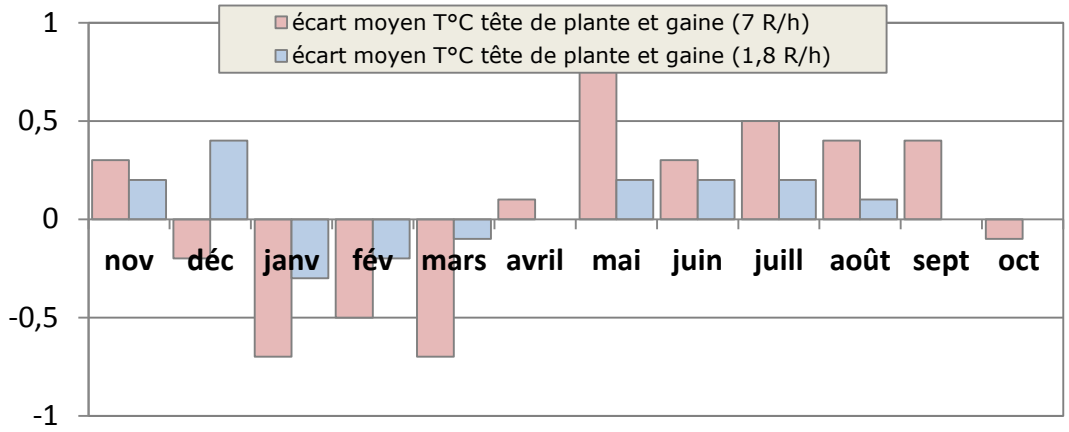
Temperatures measurements for the beginning of the season are comparable between the semi-closed greenhouse and the traditional greenhouse with deshumidification, on the other hand from the middle of the season until the end of the season there is a gap between the head of the plant and the sheath. In the semi-closed greenhouse, there is a higher humidity at the head of the plant and very large differences in relative humidity compared to the traditional greenhouse where there is a small difference and a fairly constant relative humidity over the driving. It can be observed that in the semi-closed greenhouse, there is an increase in the early life of the varieties studied, a greater production, per Kg/m^2 as well as in fruit weight.

The interest of semi-closed greenhouse crop in Brittany is limited right now, we see quite significant operating costs, particularly for heating and cooling, quite low sales prices. This greenhouse model would not be profitable for Breton producers right now. Improvements still need to be made on energy efficiency and the cost of charges.

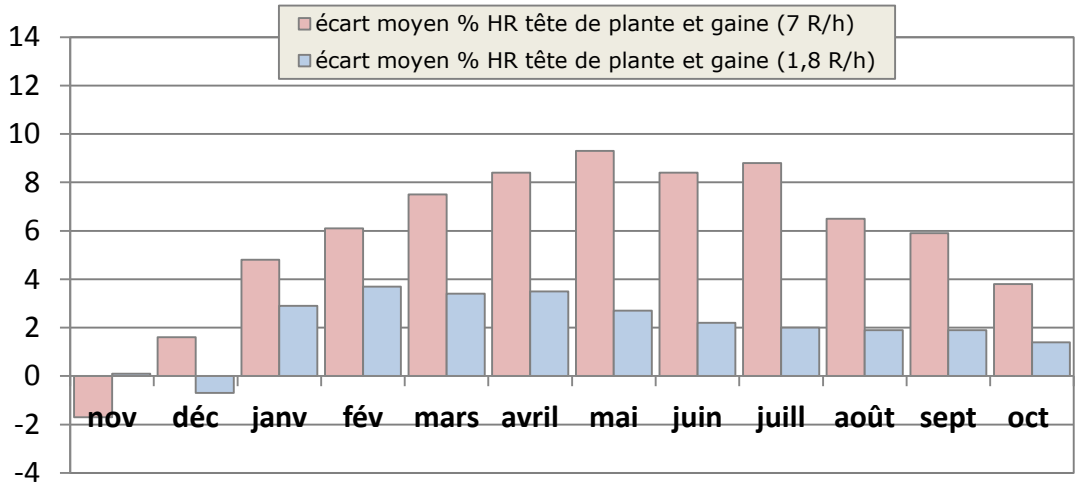
keywords : Tomato, Greenhouse, Climate management, Semi-closed-greenhouse, Energy consumption, CATE, Hydroponic, NTEPPE NYEMB, Jean Alcyon.

RapportGratuit.com

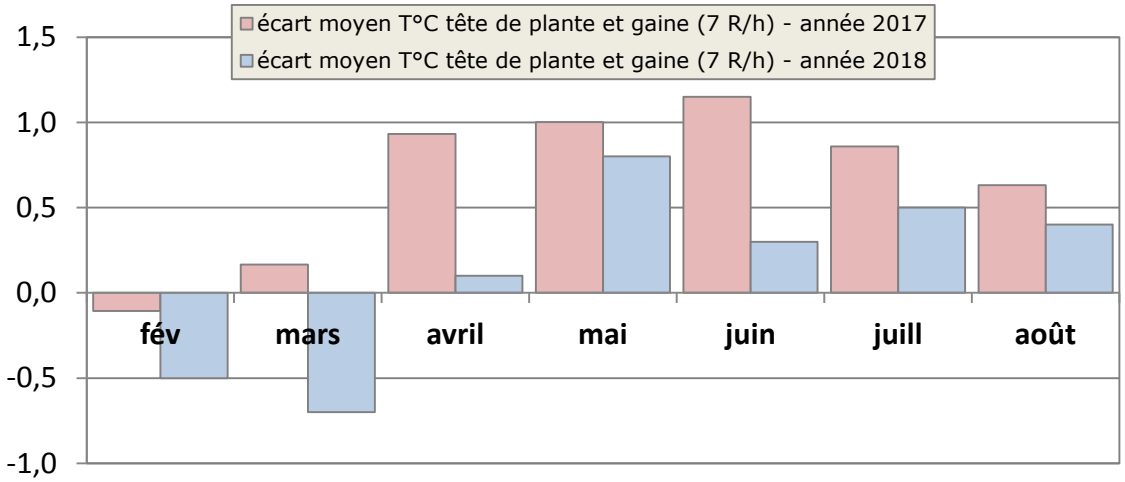
Annexes :



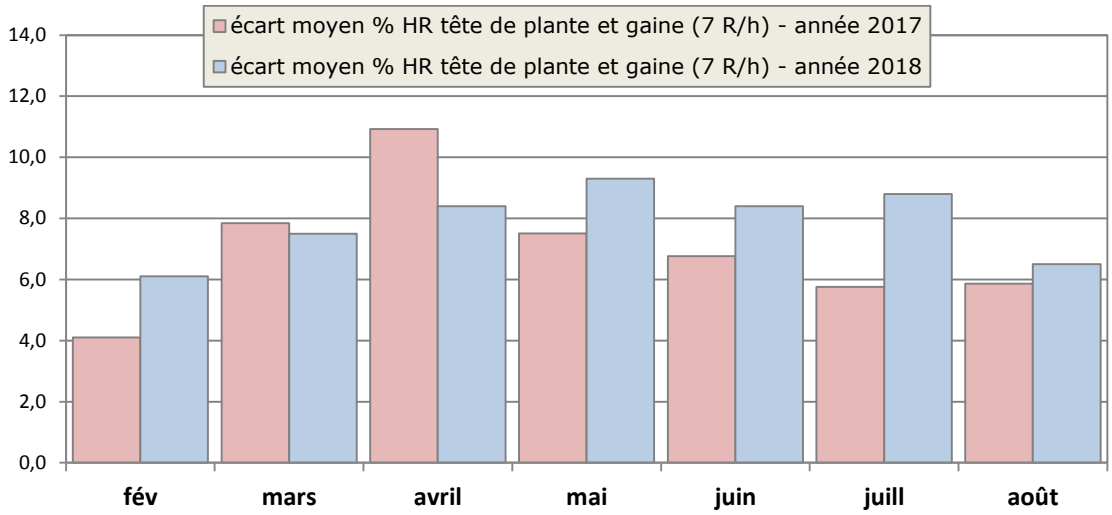
Graphique 14 : Comparaison des écarts de température entre la serre 7 R/H et la 1,8 R/H sur la période de conduite 2018



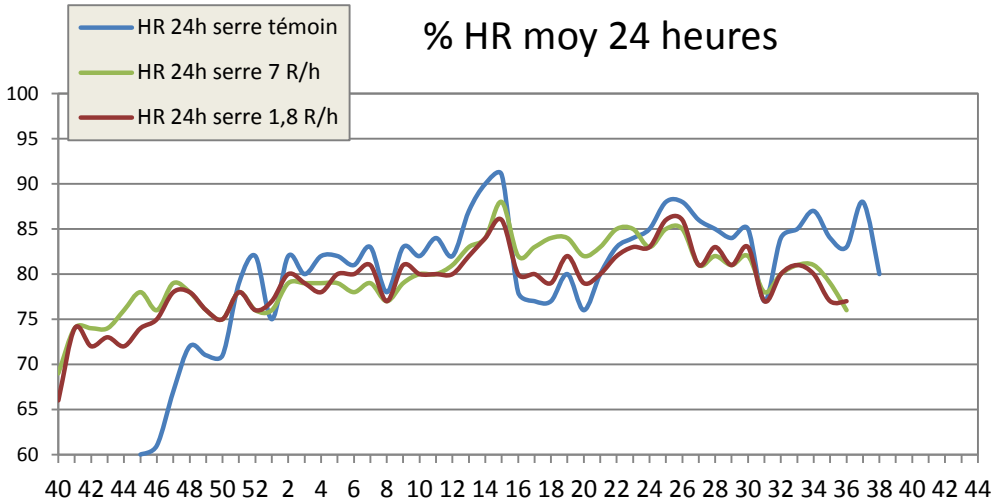
Graphique 15 : Comparaison des écarts de % de HR entre la serre 7 R/H et la 1,8 R/H sur la période de conduite 2018



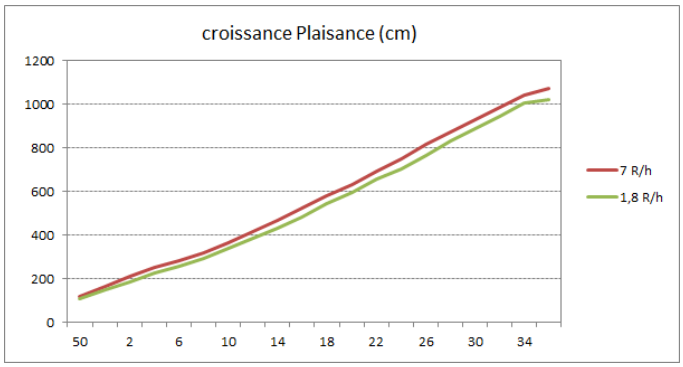
Graphique 16: Comparaison des écarts de températures entre tête de plante et gaine pour la serre 7 R/H pour les conduites de 2017 et 2018



Graphique 17 : Comparaison des écarts de % HR entre tête de plante et gaine pour la serre 7 R/H pour les conduites de 2017 et 2018

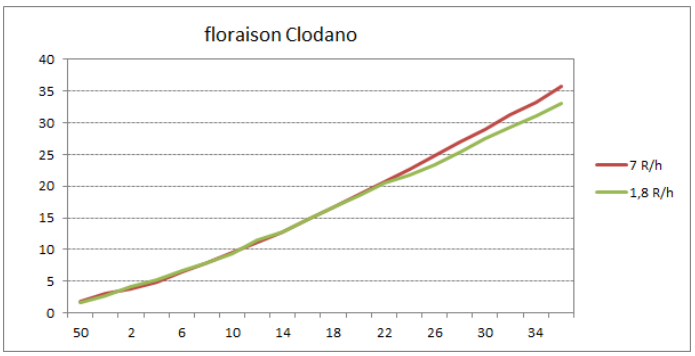


Graphique 18: Hygrométrie moyenne sous 24 H



Graphique 19 : Croissance de la variété Plaisance pour toute la période de conduite 2018

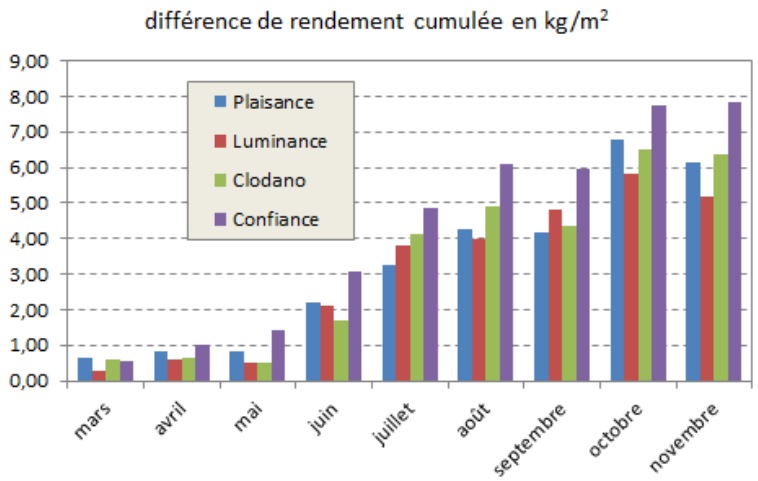
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



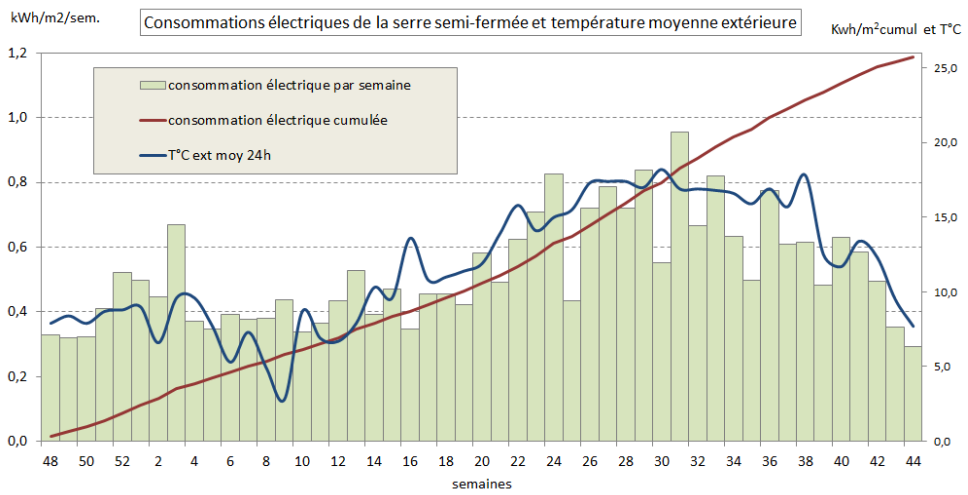
Graphique 20 : Floraison de la variété Clodano pour la période de conduite 2018

		Serre 7 R/h	Serre 1,8 R/h	**Moyenne hors témoin**
Longueur totale des plantes (cm)	Plaisance	1071	1019	**1045**
	Luminance	985	949	**967**
	Clodano	1000	988	**994**
	Confiance	922	916	**919**
	moyenne	**995**	**968**	**-**
Stade final de floraison	Plaisance	37,6	35,1	**36,4**
	Luminance	35,8	34,3	**35,1**
	Clodano	35,8	33,1	**34,5**
	Confiance	33,2	32,1	**32,7**
	moyenne	**35,6**	**33,7**	**-**

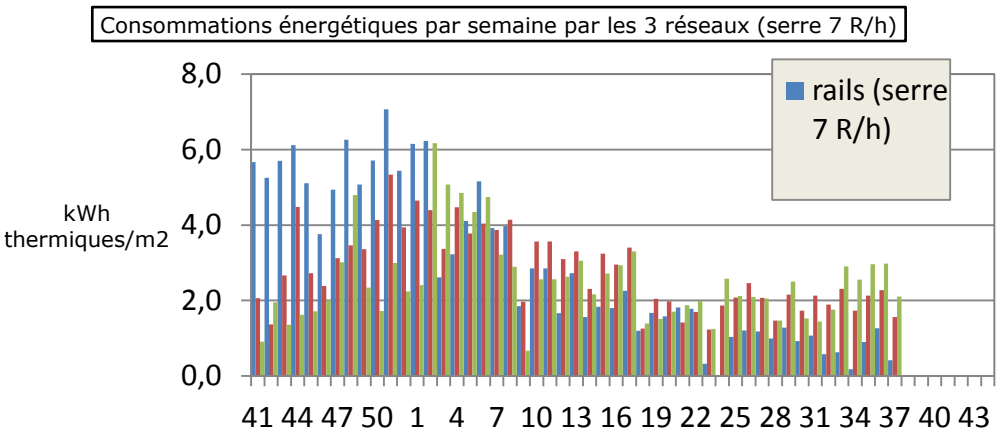
Tableau 10: Résultats agronomiques de la saison 2018



Graphique 21 : Différence de rendement cumulée en Kg/m^2 selon le mois



Graphique 22 : Consommations électriques de la serre semi-fermée et température moyenne extérieure



Graphique 23 : Consommation énergétique serre 7R/H

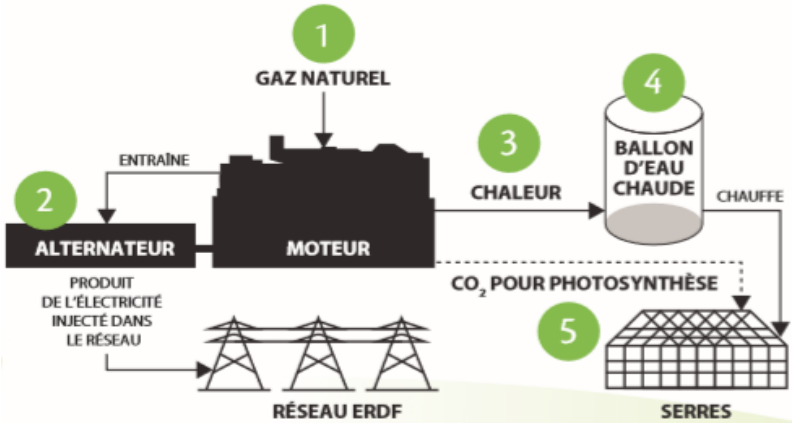
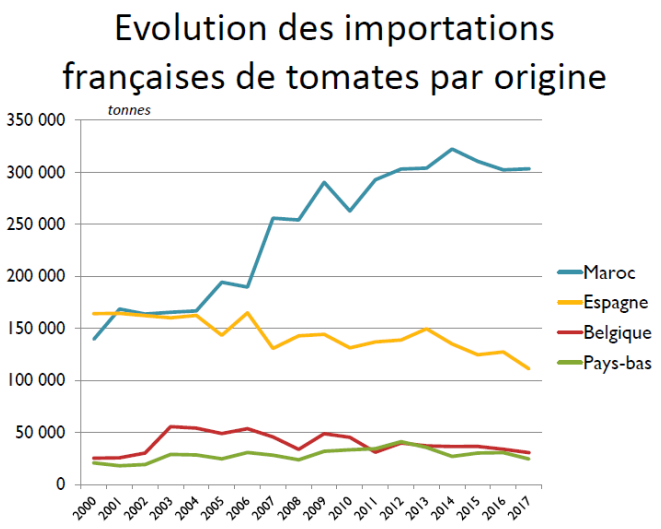
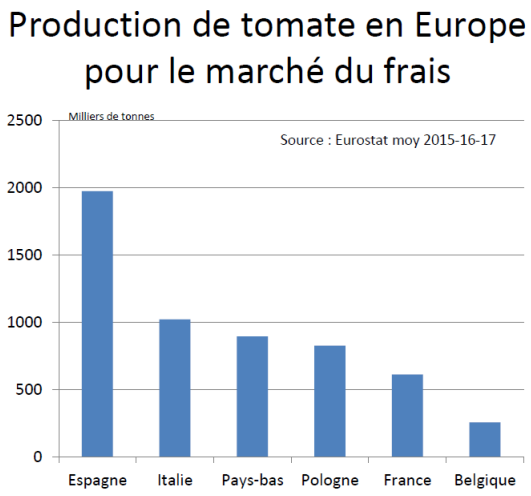


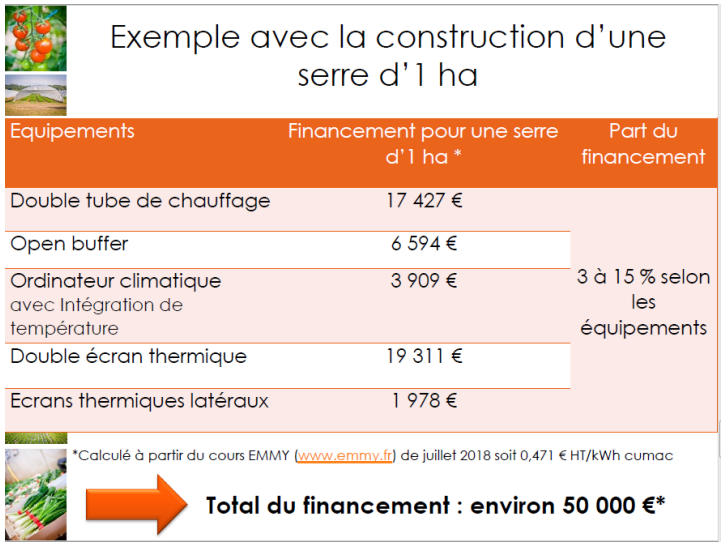
Figure 3 : Fonctionnement de la cogénération (www.agriculteurs-de-bretagne.bzh)



Graphique 24: Evolution des importations françaises de tomates par origines (Douane française, C. Hutin , CTIFL)



Graphique 25 : Production de tomates en Europe pour le marché du frais (source : Eurostat moy 2015-16-17 et C. Hutin , CTIFL)



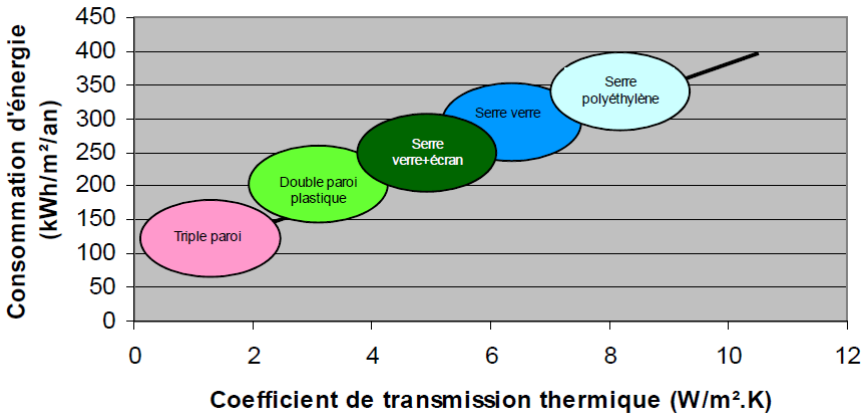
Exemple avec la construction d'une serre d'1 ha

Equipements	Financement pour une serre d'1 ha *	Part du financement
Double tube de chauffage	17 427 €	3 à 15 % selon les équipements
Open buffer	6 594 €	
Ordinateur climatique avec Intégration de température	3 909 €	
Double écran thermique	19 311 €	
Ecrans thermiques latéraux	1 978 €	

*Calculé à partir du cours EMMY (www.emmy.fr) de juillet 2018 soit 0,471 € HT/kWh cumac

Total du financement : environ 50 000 €*

Table 11: Coût d'équipement d'une serre semi-fermée (source : A.Richard et A. Grisey, CTILF)



Graphique 26 : Estimation de la consommation d'énergie en fonction des performances des performances thermiques de la paroi