



HAL
open science

Effets du TransPAR, produit d'ombrage photo-sélectif aux infrarouges courts, sur le microclimat et le développement d'une culture de tomates sous serre verre

Corentin Thibaud

► **To cite this version:**

Corentin Thibaud. Effets du TransPAR, produit d'ombrage photo-sélectif aux infrarouges courts, sur le microclimat et le développement d'une culture de tomates sous serre verre. Sciences agricoles. 2013. dumas-00905952

HAL Id: dumas-00905952

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00905952v1>

Submitted on 19 Nov 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers
2 rue André Le Nôtre
49000 Angers

SUDLAC

1 rue Gaston Monmousseau,
38130 Echirolles

INRA Avignon

Unité plantes et systèmes de cultures horticoles (PSH)
Domaine St Paul – Site AgroParc –
84914 Avignon cedex 9

Mémoire de Fin d'Études

Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage

Année universitaire : 2012 - 2013

Spécialité : Horticulture

Spécialisation ou option : Gestion Durable du Végétal en Horticulture et Paysage

Effets du TransPAR, produit d'ombrage photo-sélectif aux infrarouges courts, sur le microclimat et le développement d'une culture de tomates sous serre verre.

Par : **Corentin THIBAUD**

Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation ou son représentant

Date : .../.../... Signature

Bon pour dépôt (version définitive)

Autorisation de diffusion : Oui Non

Devant le jury :

Soutenu à Angers, le : 13/09/2013

Sous la présidence de : Josianne LE-CORFF (Maître de Conférences à Agrocampus Ouest Angers)

Maître de stage : Olivier BERTHELIER (Ingénieur d'affaire, Sudlac)

Enseignant référent : Christophe MIGEON (Maître de Conférence Agrocampus Ouest Angers)

Autres membres du jury : Etienne CHANTOISEAU (Maître de Conférences à Agrocampus Ouest Angers), Eric BRAJEUL (Directeur du centre CTIFL de Carquefou)

"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST ».

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Cadre lié à la confidentialité :

Aucune confidentialité ne sera prise en compte si la durée n'en est pas précisée.

Préciser les limites de la confidentialité ⁽²⁾ :

➤ Confidentialité absolue : oui non

(ni consultation, ni prêt)

Si oui 1 an 5 ans 10 ans

Le maître de stage ⁽⁴⁾,

Cadre lié à la diffusion du mémoire :

A l'issue de la période de confidentialité et/ou si le mémoire est validé diffusable sur la page de couverture, il sera diffusé sur les bases de données documentaires nationales et internationales selon les règles définies ci-dessous :

Diffusion de la version numérique **du mémoire** : oui non

Référence bibliographique diffusable ⁽³⁾ : oui non

Résumé diffusable : oui non

Mémoire papier consultable sur place : oui non

Reproduction autorisée du mémoire : oui non

Prêt autorisé du mémoire papier : oui non

.....
Diffusion de la version numérique **du résumé** : oui non

☞ Si oui, l'auteur ⁽¹⁾ complète l'autorisation suivante :

Je soussigné(e) _____, propriétaire des droits de reproduction dudit résumé, autorise toutes les sources bibliographiques à le signaler et le publier.

Date :

Signature :

Rennes/Angers, le

L'auteur ⁽¹⁾,

L'enseignant référent

ou son représentant

(1) auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(2) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(3) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé.

(4) Signature et cachet de l'organisme

Table des matières

1	Introduction.....	1
2	Etat de l'art de la culture de tomate	3
2.1	Le marché de la tomate	3
2.2	Méthodes de culture	4
2.2.1	Optimisation du développement végétatif	4
2.2.2	Optimisation de la qualité de la tomate	5
2.3	L'outil de production, la serre	8
2.3.1	La serre : capteur thermique.....	8
2.3.2	La température extérieure.....	10
2.3.3	Ventilation naturelle	10
2.3.4	Le contrôle de la température par les plantes	11
3	Matériel et méthode.....	12
3.1	Serre d'étude.....	12
3.2	Les produits d'ombrage	12
3.2.1	Modalités d'ombrage et modes d'application	12
3.2.2	Justification des doses et de la date d'application	13
3.2.3	Principale limite du système d'étude	15
3.3	Variables étudiées	15
3.3.1	Variables physiques (microclimatiques)	15
3.3.2	Variables Agronomiques.....	17
3.4	Analyses statistiques	19
4	Résultats-Discussion	20
4.1	Impact des peintures sur l'environnement physique de la plante	20
4.1.1	Rayonnement	20
4.1.2	Climat	24
4.2	Impact des peintures sur la physiologie de la plante	26
4.2.1	Développement de la plante.....	26
4.2.2	Echanges gazeux (porométrie)	29
4.2.3	Qualité du fruit.....	31
4.2.4	Potentiel photosynthétique	32
5	Conclusion	34
	Bibliographie.....	36

Remerciements

Je remercie Lilou, Hiro et Doudou qui m'ont soutenu tout au long de mon stage de fin d'étude.

Je remercie ma famille, plus particulièrement mes parents et mon frère pour leur soutien.

Je remercie particulièrement Olivier Berthelier, Jean-Pierre Perez, Jean-Jacques Longuenesse, Hélène Gautier Christophe Migeon, Marcel Schondergang et Sylvie Sérino pour toute la connaissance et les conseils qu'ils m'ont apportés.

Je remercie Eric Brajeul pour avoir accepté de faire partie de mon jury de soutenance. Je remercie l'ensemble des autres membres du jury pour le temps accordé à la lecture de mon mémoire et la participation à ma soutenance.

Je remercie Bruno Crosnier-Leconte et Pierre-Louis Dahan de la société SUDLAC ainsi que l'INRA pour m'avoir apporté le financement et les moyens techniques pour réaliser ce stage.

Je remercie les membres de l'INRA : en particulier Laurent Gomez, Patricia, Emilie Rubio, Doriane Bancel.

Je remercie les membres du CTIFL de Carquefou et de Ballandran pour m'avoir apporté beaucoup de réponses techniques aux questions que je me posais pour mettre en place l'essai : Lesourd Dominique, Loda Denis, Raphaël Tisiot.

Je remercie Erik Runkle, Claire Goillon de l'APREL et Thierry Boulard pour leur aide.

Je remercie Kiki pour sa bonne humeur et sa gentillesse quotidienne.

Je remercie l'ensemble des stagiaires, thésards et techniciens avec qui j'ai pu passer de bons moments.

Glossaire

Absorption : tout corps absorbe une partie du rayonnement solaire (univ Paris 1). En pénétrant dans les différentes couches atmosphériques, certains rayons sont absorbés par certaines molécules de l'atmosphère.

Acide ascorbique : vitamine C.

Déficit hydrique de l'air : c'est le déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air.

Espèces actives de l'oxygène : espèces chimiques oxygénées telles que des radicaux libres, des ions oxygénés et des peroxydes. Elles jouent un rôle important dans la communication intercellulaire mais en cas de rayonnement excessif, elles sont produites en excès et deviennent alors nocives pour l'organisme vivant.

Infra-rouges courts : Ils s'étendent principalement de 700 à 2100-2700nm selon les différentes sources bibliographiques.

Rayonnement photosynthétiquement actif : C'est la puissance du spectre solaire s'étendant de à 400-700nm. Elle correspond approximativement au spectre visible pour l'œil humain.

Rayonnement global : C'est l'énergie rayonnante totale du Soleil dont la majorité se situe entre 250 et 2700 nm.

Rayonnement infra-rouges longs (RIL) : encore appelés infrarouge thermiques, c'est le rayonnement de longueur d'onde supérieure à 5000nm.

Réflexion : elle se définit « comme un changement de direction du rayonnement électromagnétique quand celui-ci atteint une surface matérielle » (univ Paris1). Une partie du rayonnement solaire est directement réfléchi vers l'espace par certains corps de l'atmosphère.

Transmission : Il y a transmission du rayonnement lorsque celui-ci passe à travers un milieu matériel. Le rayonnement peut-être transmis intégralement lorsqu'il traverse une surface transparente mais moins le milieu est transparent au rayonnement moins celui-ci est transmis.

Ultra-violets : Energie rayonnante solaire de 250 à 400nm.

Ultra-violets A : Energie rayonnante solaire de 320 à 400nm.

Liste des abréviations

-IR : infra-rouges.

-IRC : Infra-Rouge-Courts

-MS : masse-sèche.

-RPA : Rayonnement Photosynthétiquement Actif.

-PC : peinture classique.

-PPS : peinture photo-sélective

-PS : photosynthèse.

-Rg : Rayonnement global.

-RIL : Rayonnement Infra-rouge Long.

-UV : ultra-violets.

-UV-A : ultra-violets A.

1 Introduction

La serre permet de créer un environnement favorable au développement des cultures à travers un contrôle facilité des paramètres climatiques et en les protégeant des intempéries (Kumar, 2009). Néanmoins, l'utilisation des serres n'a pas que des avantages. En été, la température peut être trop élevée à l'intérieur. De plus, avec le réchauffement climatique, le maintien de températures convenables est une problématique d'intérêt croissant chez les producteurs. Le rayonnement solaire est principalement responsable de l'augmentation de la température ambiante de la serre. Il peut nuire aux cultures soit par effet direct du rayonnement sur la plante (Thomas, 1986) soit par augmentation de la température ambiante jusqu'au dépassement d'un seuil critique. Des aménagements de la serre existent pour lutter contre ce problème. En France, en fonction de la latitude, ce rayonnement est plus ou moins problématique. Ainsi l'ombrage est une technique courante pour limiter la charge énergétique pénétrant dans la serre (Baille, 2001) et les techniques d'ombrage utilisées varient selon la localisation de l'exploitation. Différents procédés existent, tels que l'utilisation :

-d'écrans d'ombrage dans le Sud

-d'écrans thermiques utilisés comme écrans d'ombrage l'été dans la partie Nord

-de produits d'ombrage (ou peintures) dans toutes la France mais plus particulièrement dans le Sud de la France

Actuellement, lorsque les cultures sont soumises à un rayonnement intense durant de longues périodes, les peintures restent la solution la plus adéquate (Stanghellini, 2011). En effet, les peintures sur toiture réfléchissent le rayonnement avant que celui-ci n'entre dans la serre, tandis que les écrans piègent la charge énergétique à l'intérieur.

De plus, les écrans présentent divers inconvénients. L'investissement initial est élevé. Ils peuvent poser des problèmes de ventilation. En hiver, ils induisent des ombres portées. Utilisés comme écran d'ombrage, les écrans thermiques voient leur durée de vie diminuée.

Ainsi, l'utilisation de peintures d'ombrages est une pratique courante.

Les peintures classiques (PC) à base de carbonates de calcium réduisent fortement la transmission du rayonnement utile à la photosynthèse (ou RPA) provoquant une réduction de la photosynthèse proportionnelle à la dose appliquée (Kittas, 2003), ce qui a comme inconvénient de réduire le rendement (Stanhill, 1973 ; Hemming, 2006 ; Kempkes, 2008).

Pour éviter cette baisse, il est essentiel de mettre au point des peintures qui limitent la transmission des rayonnements infrarouges courts (IRC) plus que celle du RPA. Ainsi depuis 2006, des produits d'ombrage avec un ratio de transmission RPA/IRC plus élevé que celui des produits d'ombrage classiques ont été développés et commercialisés (Blanchard, 2010). Cette qualité est due à l'utilisation de mica enrobé de dioxyde de titane, un pigment aux propriétés optiques différentes du carbonate de calcium.

La société SUDLAC dans laquelle je réalise mon apprentissage commercialise la peinture photo-sélective (PPS) TransPAR. Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à la filtration des infra-rouges courts et leur intérêt pour les cultures sous serre (Hemming, 2005 ; Sonneveld, 2006 ; Impron, 2008 ; Kempkes, 2008 ; Kumar 2009 ; Garcia-Alonso, 2010 ; Stanghellini, 2011 ; Gulrez, 2013 ; Lamnatou, 2013) mais peu concernent spécifiquement les PPS (Von Elsner, 2003, 2005 ; Mutwiwa, 2007, 2011 ; Stanghellini, 2008) et seul un essai conduit par Blanchard (2010), a été réalisé dans une région des Etats-Unis climatiquement comparable avec le Sud de la France mais sur une culture de plantes d'ornement. En outre, plusieurs essais de recherche appliquée ont été réalisés par SUDLAC et le CTIFL pour évaluer les effets de ces peintures sur le microclimat et sur la plante. Certains producteurs

utilisant le TransPAR observent des effets bénéfiques sur leur culture mais sans pouvoir expliquer leur origine ou les quantifier. D'une manière générale, les PPS permettent d'obtenir le même abaissement de la température que celui induit par l'utilisation d'une PC mais avec une transmission supérieure du rayonnement RPA ce qui augmente la photosynthèse potentielle et donc le rendement potentiellement obtenu.

Aujourd'hui, les arguments en faveur de l'utilisation de ces peintures ne sont pas encore assez nombreux pour convaincre totalement les producteurs qui utilisent toujours majoritairement le blanchiment classique. Il apparaît donc nécessaire d'obtenir plus de données pour parvenir à mieux utiliser le TransPAR (doses et date d'application) mais aussi pour parvenir à adapter la conduite culturale pour valoriser ses qualités intrinsèques. Par ailleurs, en raison du coût élevé des peintures photo-sélectives, celles-ci sont principalement utilisées avec des systèmes à forte valeur ajoutée comme les cultures de tomates et de fraises sous serre verre.

La maîtrise du climat printanier et estival sous serre tout en permettant une transmission du RPA élevée est une problématique d'actualité qui sera traitée dans ce rapport :

-quels sont les impacts des peintures d'ombrage sur le climat ? La végétation ?

-la PPS TransPAR est-elle un produit d'avenir ?

Pour répondre à ces questions, une expérimentation a été mise en place dans le Sud-Est de la France dans une serre verre de culture de tomates. En plus du TransPAR, la peinture Eclipse LD (Longue Durée) a été choisie pour servir de témoin. Sa tenue dans le temps similaire à celle du TransPAR et son utilisation courante par les producteurs ont été les deux arguments principaux ayant motivé son choix pour servir de témoin.

L'objectif principal de cette étude était de fournir des données quantifiées pour comparer les effets du TransPAR et d'Eclipse sur le rayonnement, le microclimat et le fonctionnement de la culture.

Plusieurs sous-objectifs ont été traités :

- obtenir des informations complémentaires aux données obtenues par le laboratoire de SUDLAC et lors d'essais précédents au CTIFL (Brajeul, 2010 et 2011 ; Tisiot 2010 et 2011).

- caractériser et analyser les effets de deux peintures d'ombrage sur le rayonnement et le microclimat.

- caractériser et analyser les effets du microclimat sur le développement, la croissance, la production de fruits (rendement, qualité) et l'occurrence de maladies.

- analyser l'intérêt de ces modifications pour la culture des tomates.

En se basant sur la bibliographie et les résultats d'essais antérieurs, les hypothèses de résultats suivantes sont formulées :

-rayonnement global identique et RPA supérieur en TransPAR.

-photosynthèse supérieure en TransPAR.

-température d'ambiance et déficit hydrique ambiants égaux.

-poids moyen des fruits égal voir supérieur.

-caractère génératif des plants plus marqué en TransPAR.

-un rendement supérieur est attendu en TransPAR.

-qualité chimique supérieure.

Pour aborder le sujet, un état de l'art sur la culture de tomate a d'abord été réalisé puis en deuxième partie la méthodologie et le protocole mis en place pour répondre aux questions posées sont décrits. En troisième partie, les résultats et la discussion sont présentées et pour aboutir en dernière partie à la conclusion sur les apports de cet essai et les perspectives à venir.

2 Etat de l'art de la culture de tomate

Cette partie a pour but de montrer l'importance de la culture de tomate tant dans le monde qu'en France.

2.1 Le marché de la tomate

Au niveau mondial, en 2011, la production a atteint 159 millions de tonnes pour 4,7 millions d'ha, les principaux producteurs étant la Chine, l'Inde et les USA (FAOSTAT, 2013).

En France, environ 600 000 tonnes ont été produites en 2011 (Figure 1) soit un peu moins de 1% de la production mondiale, ce plus particulièrement dans le Sud-Est où 200 000 tonnes sont produites chaque année, ce qui représente 1/3 de la production française (Fresignac, 2012).

La tomate reste l'un des produits maraîchers les plus consommés au monde ainsi qu'en France. Au niveau mondial, la production et la consommation sont en augmentation (USDA, 2010). En France, la production stagne du fait de la forte concurrence des importations de tomates étrangères à coût réduit.

Les tomates sont produites toute l'année mais la production est variable et la Figure 1 montre que la quantité produite mensuellement évolue selon une courbe de Gauss durant l'année. En France, le pic de production est atteint en Juillet : 100 000 tonnes en 2012.

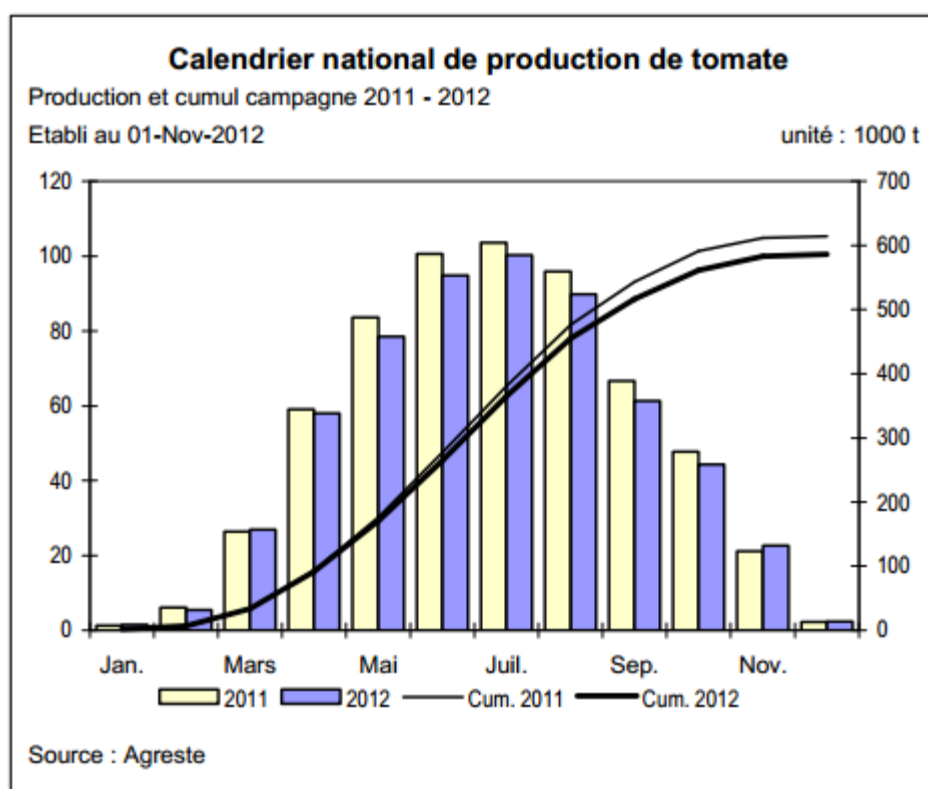


Figure 1 : calendrier de production national de tomate 2011-2012.

Ainsi, la production de tomate est un marché en expansion. Cependant, pour faire face au développement de cette production dans les pays où la main d'œuvre est bon marché, la filière française se doit d'augmenter les rendements à travers la modernisation de ses méthodes de cultures.

2.2 Méthodes de culture

En France, 80% des tomates sont cultivées sous serre (Agreste, 2012).

La partie qui suit développe les paramètres climatiques essentiels à l'optimisation de la production, tant pour obtenir un bon rendement, qu'une tomate de bonne qualité. Le fonctionnement de la serre est présenté ultérieurement.

2.2.1 Optimisation du développement végétatif

La photosynthèse (PS) est le phénomène qu'il faut chercher à maximiser en culture de tomates. Elle dépend de nombreux paramètres climatiques dont les plus importants sont présentés dans cette partie.

2.2.1.1 Importance du rayonnement

Le rayonnement solaire global ou R_g (300 à 2700nm) apporte l'énergie nécessaire à la plante pour réaliser la PS. Sur une culture de tomate cultivée sous serre durant un an, Cockshull (1992) a montré que pour 1% de R_g en plus, le rendement augmente de 1%. Plus particulièrement, c'est le rayonnement utile à la photosynthèse ou RPA (400-700nm) qui permet l'assimilation du CO_2 atmosphérique par la plante (Kläring, 2012) et qui va servir à la construction du squelette carboné ainsi qu'au fonctionnement de la plante. Cette énergie assimilée est utilisée à travers le processus de respiration qui est fortement dépendant de la température. Deux types de respiration coexistent :

- la respiration de croissance qui elle sert à la construction de l'organisme.
- la respiration d'entretien qui permet aux cellules déjà existantes de fonctionner.

Ainsi, le rendement d'une culture en $kg.m^2$ est directement lié à la respiration de croissance.

2.2.1.2 Importance de la température

Au cours d'une journée, d'innombrables réactions biochimiques ont lieu au sein de la plante. Or, celles-ci sont toujours dépendantes de la température, ce qui explique l'importance de ce paramètre.

Chez les végétaux, le $0^\circ C$ végétatif est la température seuil en-dessous de laquelle plus aucune croissance n'est observée. Pour la tomate, le $0^\circ C$ végétatif est atteint dès les valeurs de températures comprises entre 12 et $16^\circ C$ (Navez, 2012).

Chez la tomate, la réponse de la PS à l'accroissement de la température suit une courbe passant par un optimum (entre $22^\circ C$ et $25^\circ C$) (Navez, 2012) et en dehors de la plage de températures comprises entre $20^\circ C$ et $25^\circ C$, la photosynthèse décroît fortement.

2.2.1.3 Importance du déficit hydrique de l'air

La vapeur d'eau contenue dans l'air a un impact prépondérant sur le fonctionnement de la plante. L'Humidité Relative (HR) est le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la même température. C'est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions. Néanmoins, cette variable n'est pas la plus adéquate pour gérer le climat de la serre car pour une même valeur d'HR, le contenu réel en eau de l'air (ou humidité absolue) varie selon la température. L'Humidité Absolue (HA) s'exprime en g d'eau/ kg d'air sec (Agriréseau, 2005). En pratique, on préfère utiliser le Déficit Hydrique (DH) qui est la différence entre l'HA d'un air saturé en vapeur d'eau à une température donnée et l'HA réellement contenue dans l'air ambiant à la même température. Le DH s'exprime en g d'eau/ m^3 d'air sec. Un DH inadapté à la culture entraînent la fermeture des stomates et limitent les échanges gazeux de la plante avec son environnement ce qui impacte immédiatement la PS ainsi que de très nombreux processus physiologiques. Au printemps et en été, un DH ambiant compris entre 5 et 6 g/kg d'air sec est optimal et au-delà de 10 g/kg d'air sec, les plantes commencent à être stressées (Wacquant, 1995).

Plus la température de l'air est élevée plus celui-ci peut contenir de vapeur d'eau. Par exemple, pour une augmentation de 10°C, la capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau double et l'humidité relative est diminuée de moitié.

2.2.1.4 CO₂

La molécule de base utilisée par la tomate pour synthétiser l'ensemble des molécules de son squelette carboné est le CO₂. En 2013, la teneur en CO₂ de l'atmosphère est de 400 ppm. Or, à l'intérieur de la serre, avec le confinement et la forte consommation du CO₂ par la culture, cette teneur peut baisser à 320-300ppm. Les flux de CO₂ à travers les stomates sont régis par la loi de Fick et suivent donc les gradients de concentration. On comprend alors que plus la teneur est faible moins la plante peut absorber de CO₂ rapidement, elle peut donc être sous-alimentée en CO₂. Pour pallier à ce problème, une bonne ventilation est nécessaire afin de maintenir un niveau correct de 400ppm. Pour une serre naturellement ventilée, il est très rare que la teneur en CO₂ soit inférieure à 350 ppm (Bunce, 2000).

Néanmoins, il a été montré que la teneur optimum pour le développement de la culture est de 600 ppm et la teneur maximum de 1000ppm (Atherton, et.al, 1986 ; Körner, 2008) Il devient alors intéressant d'apporter du CO₂ supplémentaire aux plantes.

Par ailleurs, Acock (1978) a montré que les feuilles de la partie supérieure de la canopée sont responsables de l'absorption de 66% du CO₂ fixé par l'ensemble de la canopée.

Synthèse de la partie 2.2.1

La PS dépend du Rg reçu, de la température, de l'humidité relative et du CO₂ (Dayan, 1985 dans Mutwiwa 2006). Ainsi, la réussite d'une culture de tomates résulte de l'adéquation entre les différents paramètres climatiques, à mettre en lien avec le stade de développement de la culture.

2.2.2 Optimisation de la qualité de la tomate

La partie qui suit présente ce qu'est la qualité du fruit de tomate et comment utiliser les paramètres climatiques dans le but d'obtenir une qualité maximale.

2.2.2.1 Définition de la qualité

La qualité d'un fruit se définit tant à partir de critères visuels que de sa composition biochimique. Vont entrer en jeu : la taille du fruit, son contenu en nutriments (matières sèches, vitamine C, etc...), sa couleur, la texture de sa chair, son goût. (Génard, 2007)

Par exemple, un taux de sucres et d'acides organiques élevés contribue à augmenter la qualité du fruit. (Davies, 1981).

Actuellement, la valorisation des tomates sur le marché du frais dépend en priorité de l'aspect visuel du fruit puis de sa qualité organoleptique qui est elle-même directement liée à sa composition chimique.

La composition est donc plus difficilement valorisable mais des organismes de recherche tels que l'INRA et le CTIFL travaillent à la mettre en valeur. La qualité chimique pourrait prendre d'autant plus d'importance que les consommateurs se plaignent aujourd'hui du peu de goût de la majorité des tomates proposées dans le commerce.

2.2.2.2 Qualité visuelle

➤ La pigmentation du fruit

Chlorophylles et caroténoïdes sont les deux groupes principaux de pigment (Atherton, 1986). La coloration est un critère de vente essentiel. Or, leur teneur relative est le principal déterminant de la coloration du fruit. Lors de la conservation, la persistance de la coloration des fruits fraîchement épluchés et découpés est corrélée avec la quantité d'acide ascorbique (E300) et d'acide citrique (E330) (Veronica Van der Spek, 2009).

➤ *Taille du fruit*

La taille du fruit est sous contrôle génétique et environnemental (Dumas, 2003). A travers l'itinéraire cultural, le producteur pourra donc obtenir des fruits d'un calibre plus ou moins important. Il faut néanmoins garder en mémoire que la taille finale du fruit est corrélée au nombre ou au poids des graines et au nombre de locules (Imanishi, 1975).

➤ *Forme du fruit*

Selon les variétés, les formes varient. La tomate de type Marmande est par exemple côtelée alors que les variétés Clodano ou Climberley sont des tomates de type ronde. Une pollinisation réussie est le principal facteur responsable de l'obtention de la forme attendue du fruit.

➤ *Maladies physiologiques affectant la qualité visuelle*

En régions méditerranéenne, le rayonnement, les températures et le déficit hydrique (DH) sont souvent très élevés dans les serres. Cela induit en été une augmentation du blossom-end-rot (BER) et des microfissures (Winsor, 1976). Ces deux anomalies résultent de problèmes de transfert d'eau au sein de la plante induisant un déficit en calcium (Ward, 1973) et ce plus particulièrement au niveau des fruits car les flux d'eau sont alors préférentiellement orientés vers les feuilles (Saure, 2001).

Le BER apparaît sous forme de taches noires tandis que les microfissures, apparaissant sous la forme de stries circulaires, sont plus difficilement repérables. Elles induisent une mauvaise conservation du fruit. Dans les deux cas, le fruit n'est pas commercialisable.

2.2.2.3 *Qualité organoleptique et composition chimique*

La qualité organoleptique est fortement dépendante de la variété de la tomate. Cependant, le goût dépend aussi du pourcentage de matière sèche et du ratio sucres solubles (glucose, fructose, saccharose) sur acides organiques (acide citrique, acide malique).

D'autres molécules, comme la vitamine C ou les caroténoïdes (lycopène), participent à la qualité du fruit car elles sont bénéfiques pour la santé.

De plus, la vitamine C a une grande importance dans le fonctionnement de la plante : elle permet par exemple de protéger la chaîne photosynthétique des espèces actives de l'oxygène qui sont produites en cas de fort rayonnement (Massot, 2010).

2.2.2.4 *Effets du rayonnement, de la température et de l'hygrométrie sur la qualité*

Le Tableau 1 répertorie différents effets du rayonnement sur la qualité du fruit. Par exemple, une augmentation du rayonnement en intensité et en durée a un effet positif sur la masse sèche et le calibre du fruit.

Tableau 1 : Effets du rayonnement sur la qualité. (+) Effet positif. (-) Effet négatif.
 Source : C. THIBAUD

Caractéristique	Effet sur la culture
Déficit	(-) Coloration du fruit (Navez, 2011) (-) Peut induire chair farineuse (Navez, 2011) (-) Risque de fruit creux (Navez, 2011)
Augmentation (durée et intensité)	(+) MS et calibre (Urban, 2010) (+) Vitamine C (synthèse et accumulation) mais seulement pour des températures inférieures à 23°C. (Navez, 2011)
Fort rayonnement	(+) Baisse de la teneur en chlorophylle dans le fruit pendant maturation (Navez, 2011) (+) Lycopène (Zhao, 2010)
Excès de rayonnement	(-) Augmentation du BER (Mutwiwa, 2006) (-) Risque de microfissures des fruits (Mutwiwa, 2006) (-) Risque de diminution du rendement (Urban, 2010)

Le Tableau 2 répertorie différents effets de la température sur la qualité du fruit. Par exemple, une température supérieure à 25°C aura un impact négatif sur le calibre car les fruits auront tendance à être plus petits.

Tableau 2 : Effets de la température sur la qualité. (+) Effet positif. (-) Effet négatif.
 Source : C. THIBAUD

Température appliquée à la culture	Effets
T adéquate	(+) Accumulation de matière sèche dans le fruit (Zhao, 2010)
T > 25°C	(-) Calibre diminue (Navez, 2011)
T > 30 °C	(-) Synthèse de lycopène limité à maturité (Zhao, 2010) (+) Production de bêta carotène maximale (Navez, 2011)
T trop faible	(-) Mauvaise nouaison d'où formes irrégulières et calibre du fruit insuffisant (Navez, 2011) (-) Risque de mucron (fruit allongé au niveau de la zone d'attache du style). (Navez, 2011) (-) Mauvaise coloration (Urban, 2010)
Ecart jour-nuit important	(+) Favorise la floraison (Urban, 2010) (+) Coloration optimale (entre 5 et 10 °C d'écart) (Navez, 2011) (-) Mauvaise coloration (si écart inférieur à 5 degrés et supérieur à 10°C) (Navez, 2011)
T° jour > T° nuit	(+) Favorise la nouaison (Urban, 2010)
T < 15°C ou T > 30°C	(-) Production de lycopène limitée (Navez, 2011)
T° > 40°C	(-) Tâches vertes peuvent persister à la maturité (Navez, 2011)
T racinaire > 28°C	(-) Risque de microfissure car absorption d'eau trop forte (Navez, 2011)

Le Tableau 3 répertorie différents effets de l'hygrométrie relative sur la qualité du fruit. On peut noter qu'à l'instar d'une température supérieure à 25°C, une hygrométrie relative inférieure à 60% induira un calibre plus faible des fruits.

Tableau 3 : Effets de l'hygrométrie sur la qualité. (+) effet positif. (-) effet négatif.
Source : C.THIBAUD

Caractéristique	Effet sur la culture
Hygrométrie faible (<60%)	(-) Calibre plus petit (Navez, 2011) (-) Risque de nécrose apicale (Zhao, 2010) (+) Meilleure composition chimique du fruit (si l'hygrométrie n'a pas atteint un seuil limitant) (Zhao, 2010) (-) Microfissures (Mutwiwa, 2006)
Hygrométrie forte (>90%)	(-) Fruits mous (Navez, 2006)

Pour obtenir des conditions optimales induisant un bon développement de la plante et une bonne qualité du fruit, la serre est un outil de production idéal.

La partie suivante montre comment la serre permet de gérer deux des paramètres climatiques les plus importants : la température et l'hygrométrie.

2.3 L'outil de production, la serre

Les aménagements et la gestion de la serre permettent de créer un environnement optimal à la culture (Kumar, 2009). En hiver, il faut maximiser le rayonnement et chauffer, alors qu'en été il est nécessaire de réduire le rayonnement et ventiler.

Quatre facteurs principaux agissent sur la température de la serre : le rayonnement solaire (ou rayonnement global), la température extérieure, la ventilation naturelle (flux d'air entre l'extérieur et l'intérieur) et la transpiration des plantes.

2.3.1 La serre : capteur thermique

2.3.1.1 Le spectre solaire

Le Soleil est la principale source d'énergie sur terre. Pour comprendre le phénomène d'élévation des températures dans une serre, il faut s'intéresser à la qualité du spectre solaire. Dans le cadre de l'étude, c'est la charge énergétique représentée par le Rg qui nous intéresse. L'ensemble du Rg est responsable de l'augmentation de la température (Laurent-Urban, 2010), cependant la charge énergétique varie en fonction de la longueur d'onde. En effet, bien que le spectre solaire s'étende au-delà de 5 µm, les longueurs d'ondes principalement responsables du réchauffement se situent entre 0,3 et 2,5 µm.

Par temps clair (sans nuages), le RPA représente environ 43% des radiations solaires (300 à 2700nm) en tenant compte du rayonnement direct mais aussi diffus (Thimijan, 1983). Les autres parties du spectre représentent respectivement :

-UV (250 à 400nm) : 6.4% dont 95% d'UV-A.

-Far Red (700 à 800nm) : 10.7%

-IRC (770 à 2700 nm) : 38.8%

(Spaargaren, 2001)

La Figure 2 présente le Rg au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer.

On constate que l'ensemble du rayonnement émis par le Soleil n'atteint pas la surface de la terre. Par approximation, on peut considérer que le rayonnement atteignant la surface terrestre est similaire à celui atteignant la surface de la mer, en particulier à Saint-Rémy de

Provence, localisation de la serre expérimentale, qui est à une altitude moyenne de 60m au-dessus du niveau de la mer.

Solar Radiation Spectrum

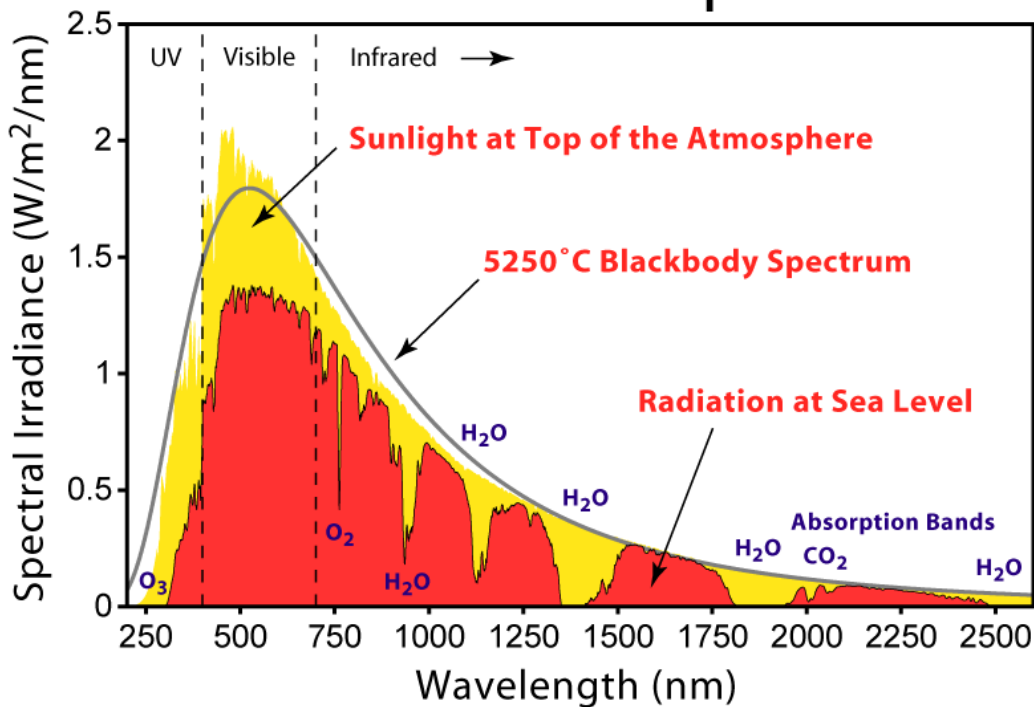


Figure 2 : Spectre solaire.

Source : http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Solar_Spectrum_png.

Cette différence de R_g entre le haut de la couche atmosphérique et la surface terrestre s'explique par l'interaction du R_g avec les molécules de l'atmosphère selon deux phénomènes optiques :

- la réflexion : elle se définit comme « un changement de direction du rayonnement électromagnétique quand celui-ci atteint une surface matérielle » (UVED, 2008). Une partie du R_g est directement réfléchi vers l'espace par certains corps de l'atmosphère.

- l'absorption : par définition, tout corps absorbe une partie du rayonnement solaire (UVED, 2008). En pénétrant dans les différentes couches atmosphériques, certains rayons sont absorbés par différentes molécules.

2.3.1.2 Transmission du rayonnement dans la serre

Il y a transmission du rayonnement lorsque celui-ci passe à travers un milieu matériel. Il peut être transmis intégralement lorsqu'il traverse une surface transparente mais moins le milieu est transparent moins celui-ci est transmis.

Lorsque le R_g atteint une serre, il est transmis à l'intérieur en traversant le verre.

La serre est donc un capteur radiatif, même si seulement 50 à 80% du rayonnement extérieur est transmis et atteint la plante. Pour les serres les plus performantes, on atteint en moyenne 70% de transmission (Brajeul, 2001).

2.3.1.3 La serre verre absorbe les RIL.

Le rayonnement infra-rouge long (RIL) correspond au rayonnement électromagnétique situé entre 5 μ m et 100 μ m. Les RIL sont donc situés entre le rayonnement visible et les

rayonnements micro-ondes. Les infra-rouges longs sont émis par les corps matériels et la longueur d'onde d'émission dans la gamme des RIL dépend de la température du corps les émettant.

L'absorption des RIL par le verre est appelé effet de serre radiatif et est complémentaire de l'effet de serre convectif. Ce dernier résulte de la limitation des flux d'air dans la serre induit par le confinement (Boulard, 2012). Effet de serre radiatif et convectif constituent les deux composantes de l'effet de serre.

La Figure 3 présente le principe d'effet de serre radiatif. Le verre transmet de façon sélective le rayonnement (Mashonjowa, 2009). Le R_g incident est majoritairement transmis à travers le verre et une faible partie est directement réfléchi. La partie transmise est absorbée par l'ensemble des matériaux de la serre induisant l'élévation de leur température de surface (Sethi, 2008). Les éléments de la serre rayonnent alors dans le domaine des RIL et réémettent une partie de l'énergie précédemment absorbée. Néanmoins, les RIL sont absorbés presque intégralement. Il émet à son tour des RIL. Environ 50% de cette énergie part vers le ciel et 50% retourne dans la serre et est absorbé par les gaz aériens, les matériaux de la serre et les plantes.

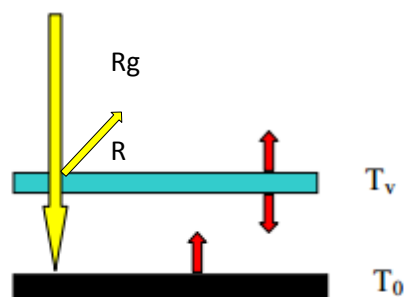


Figure 3 : Schématisation de l'effet de serre par une vitre. R_g désigne le Rayonnement global incident. T_v et T_0 désignent respectivement la température de surface du verre et celle du sol (ou de l'ensemble des matériaux de la serre). R représente la partie du R_g réfléchi par le verre. Les flèches rouges représentent les RIL. Source : C.THIBAUD

2.3.2 La température extérieure

Naturellement, les flux de chaleur sont orientés des zones les plus chaudes vers les zones les plus froides. Ainsi, selon le sens du gradient de $T^{\circ}C$ entre l'intérieur et l'extérieur de la serre, l'air extérieur peut réchauffer la serre ou la refroidir. Si la température intérieure est supérieure à la température extérieure, alors les transferts thermiques se feront de la serre vers l'extérieur et celle-ci libérera de l'énergie thermique. Inversement, si la température intérieure est inférieure à celle à l'extérieur, les transferts thermiques se feront de l'extérieur vers l'intérieur.

Il faut également tenir compte de la stratification des températures induite par le confinement. En été, en pleine journée ensoleillée, un gradient ascendant de températures se forme du sol de la serre à la toiture. Juste en dessous de la toiture, la température est ainsi plus élevée qu'au sein de la culture mais aussi qu'à l'extérieur : les flux de chaleur se font donc de la serre vers l'extérieur. Ce point est important à prendre en compte puisque les mesures de température ambiante se font en générale à l'aide de sondes de température placées au sein de la végétation et non à l'apex des plantes où la température est relativement plus élevée. Les mesures de températures réalisées ne sont donc pas parfaitement représentatives des conditions de températures que subissent les différentes strates de la végétation.

2.3.3 Ventilation naturelle

La ventilation joue un rôle important sur la température de la serre (Fatnassi, 2003). Dans une serre, l'air est tellement confiné que la diminution de la vitesse d'air est de 10 à 20 fois

inférieure par rapport à l'extérieur (Boulard, 2012). De jour et par fort rayonnement, la présence faible voir l'absence de mouvements de convection ou d'advection d'air est le principal phénomène responsable de l'augmentation de la température dans la serre.

L'importance de la ventilation naturelle est directement corrélée à la vitesse du vent à l'extérieur de la serre (Mashonjowa, 2010). Ainsi, par journée ensoleillée, plus la vitesse du vent est élevée plus le refroidissement de la serre à travers la ventilation naturelle est important.

De jour, la photosynthèse induit principalement une consommation de CO₂ et un rejet d'O₂ ce qui tend à appauvrir l'air ambiant en CO₂ et l'enrichir en O₂. Or, au printemps et en été, la majorité des producteurs n'utilisent pas de système d'injection de CO₂. La ventilation naturelle a donc un rôle prépondérant dans le renouvellement des gaz de la serre, notamment le CO₂ et l'O₂, du fait qu'elle permet les échanges de ces molécules entre l'extérieur et l'intérieur.

2.3.4 Le contrôle de la température par les plantes

Une expérience a montré qu'avec une culture de tomates en été, la température est en moyenne 10°C inférieure par rapport à une serre vide (Boulard, 2010). De plus, lorsque la densité de plantation est doublée, la température ambiante est réduite (Kleinhenz, 2006). D'autre part, Willits (2000) confirme que l'augmentation de la densité du feuillage a un effet prépondérant sur la diminution de la température par rapport aux autres méthodes de refroidissement. Cette différence s'explique grâce à la transpiration des végétaux (Katsoulas, 2001). Lorsque la température de la plante est trop élevée, une partie de son eau se vaporise, ce qui nécessite une très grande quantité d'énergie. Grâce à ce processus, les plantes possèdent un fort pouvoir climatisant. Or, c'est principalement le Rg qui alimente la transpiration. En effet, en théorie, seul 25% du RPA peut être absorbé par les plantes pour la PS. Mais le RPA ne représente que 45% du Rg. Ainsi, l'efficacité maximum de conversion du Rg pour la PS est de 11%. Néanmoins, en pratique celle-ci est de 3 à 6% du Rg (FAO, 1997) Ainsi, environ 95% de l'énergie solaire n'est pas utilisée pour la photosynthèse et est dissipée selon deux processus :

- principalement en chaleur à travers le processus de non-photochemical quenching impliquant les chlorophylles et participant au phénomène de transpiration.
- soit par fluorescence.

En résumé :

En tant que compartiment clos la serre capte le Rg et se réchauffe. Les serres verre, du fait des propriétés optiques du verre, absorbent le rayonnement infrarouge long amplifiant la hausse de la température ambiante. Les flux d'air étant limités, le refroidissement de la serre par ventilation naturelle est faible. Ainsi, en été, une serre en verre peut se transformer en véritable four et induire un climat défavorable à la culture, c'est pourquoi des aménagements supplémentaires sont nécessaires pour contrôler le climat comme par exemple l'ombrage à l'aide d'écrans ou de peinture.

3 Matériel et méthode

3.1 Serre d'étude

L'essai a été réalisé au sein de l'exploitation de Jean-Pierre Perez, producteur de tomates grappes hors-sol à Saint-Rémy de Provence ((lat, lng) = (43,79 ; 4,83) ; EARL Perez et Fils, Les Chutes, 13120, Saint-Rémy de Provence).

La culture est conduite selon les pratiques commerciales des producteurs de Provence.

L'intégralité de la production provient de deux serres multi-chapelle de type Venlo de 1 ha chacune d'une hauteur de 4,5 m sous chéneau (Figure 4). Chaque année, la plantation des plants en serre se fait en Octobre. La variété cultivée est Climberley avec en début de culture une densité de 2,1 tiges/m² et une augmentation de densité de 2,8 tiges/m² durant la 3^{ème} semaine de Janvier. L'entrée en production commence vers mi-Janvier.

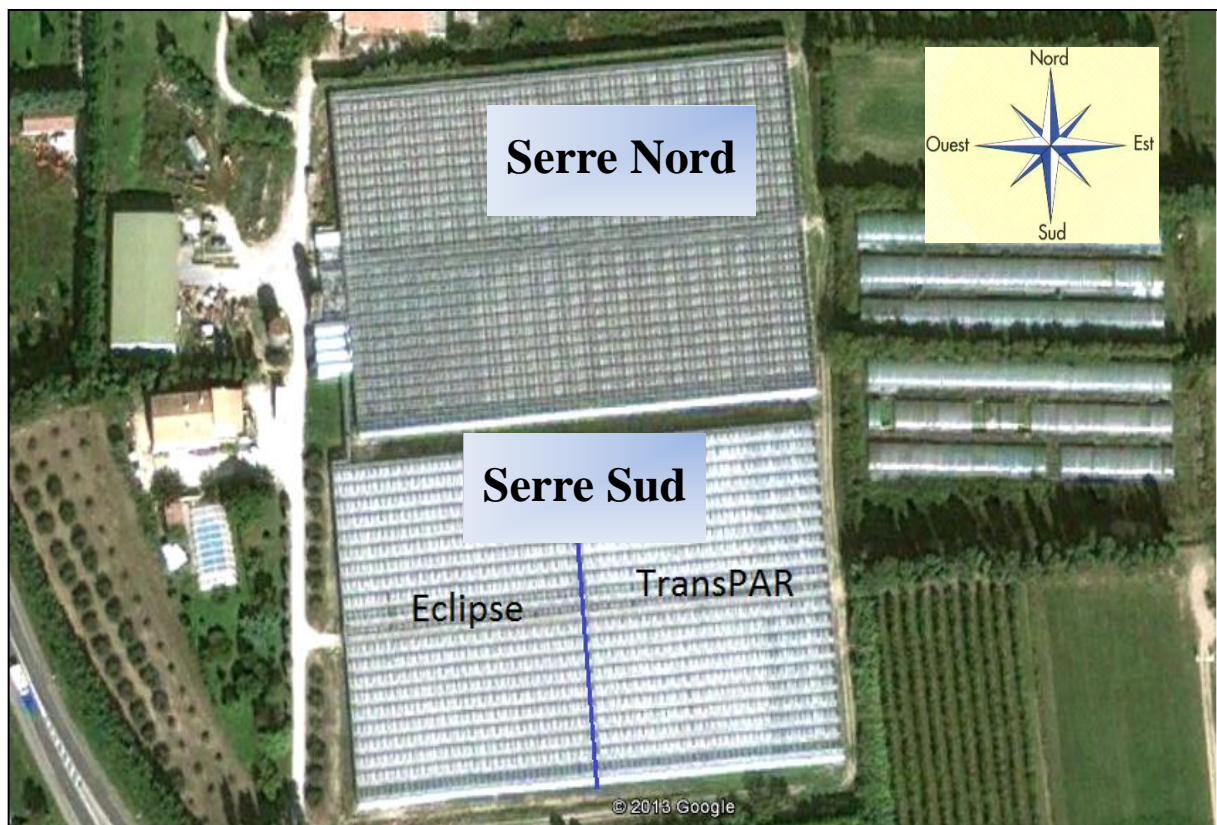


Figure 4 : vue aérienne de l'exploitation de Jean-Pierre Perez.

Source : www.maps.google.fr

3.2 Les produits d'ombrage

3.2.1 Modalités d'ombrage et modes d'application

➤ Modalités d'ombrage

A partir de la problématique posée et de l'objectif principal de l'étude, il a été décidé de tester deux modalités de peinture d'ombrage. La comparaison s'est faite entre un témoin blanchi à l'aide d'une peinture classique représentée par le produit Eclipse LD® (modalité témoin) et d'un produit de couverture réfléchissant les infra-rouges courts ou encore photo-sélectif aux infra-rouges courts (IRC = Near Infra-red Reflection) représenté par le produit TransPAR® (modalité testée) tous deux conçus et produits par la société Sudlac (Tableau 4). La serre Sud a été utilisée pour l'application des peintures (Figure 4). Elle est divisée en deux parties

par une cloison d'axe Nord-Sud. Chaque produit a été appliqué sur la moitié de la serre soit une surface de ½ ha.

➤ *Mode d'application des produits*

Deux applications décalées dans le temps ont été réalisées par hélicoptère. L'hélicoptère alterne les directions d'application en volant successivement selon l'axe Nord-Sud puis l'axe Est-Ouest dans le but d'obtenir une application plus homogène. 100kg/ha d'Eclipse et 330 kg/ha de TransPAR ont été appliqués lors de la première application le 17 Avril puis une seconde couche a été ajoutée le 6 Juin à raison de 80 kg/ha en Eclipse et 120 kg/ha en TransPAR. Au total, 180kg/ha d'Eclipse et 450kg/ha de TransPAR ont été appliqués.

Le choix de ne pas utiliser de serre témoin sans application a été fait délibérément en raison de l'ensoleillement estival très intense en Provence. La majorité des producteurs sont obligés tôt ou tard d'utiliser un produit d'ombrage. Seuls de rares producteurs équipés de serres récentes avec brumisation et écran d'ombrage peuvent s'affranchir d'utiliser des produits d'ombrage en toiture.

➤ *Doses d'application des peintures*

Tableau 4 : Dates et doses d'application des peintures. Source : C.THIBAUD

Modalité	17 Avril	6 Juin	Total
Eclipse LD (Témoin)	-100kg/ha	-80kg/ha	180kg/ha
TransPAR	-330kg/ha	-120kg/ha	450kg/ha

NB : Pour limiter les effets de bordures, les parois latérales Est, Sud et Ouest ont été blanchies à une dose de 60kg/ha à l'aide d'un autre produit d'ombrage, Climalux® (SUDLAC)

3.2.2 Justification des doses et de la date d'application

Un des aspects de l'étude est la volonté de s'aligner sur les pratiques des producteurs. Le choix des doses et dates d'application a donc été réalisé en s'appuyant après concertation entre la société Sudlac, Jean-Pierre Perez et son consultant de la société Van Der Valk Robert Johannes.

Le choix de réaliser deux dates d'application se base donc à la fois sur des données théoriques issues du laboratoire (Figure 5) de Sudlac mais aussi sur des données empiriques à travers l'expérience des serristes (Baille, 2001) qui généralement appliquent les PC en deux couches au cours du cycle de culture. La Figure 5 présente des données de transmission qui ont été obtenues en laboratoire à partir de l'émission d'un rayonnement direct et vertical à travers une plaque de verre horticole nu ou couverte d'un produit d'ombrage (Eclipse LD ou TransPAR) à différentes doses. Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre dans la plage de longueur d'onde de 300 à 2500 nm.

En Avril, l'intensité de rayonnement maximale et la température maximale ne sont pas aussi élevées qu'au mois de Juin. Les produits ombrant pouvant limiter considérablement la pénétration du RPA, il est nécessaire de réaliser un compromis entre occultation du Rg mais aussi la capacité des plantes à photosynthétiser à partir du RPA à leur disposition après l'application de peinture. Avec l'expérience, les producteurs ont déterminé qu'une dose de 180-200kg/ha de blanchiment classique permettait une bonne protection contre le rayonnement. A une dose de 180kg/ha d'Eclipse, le pourcentage de transmission est légèrement inférieur à 50% dans le RPA (Figure 5) ; ce qui représente en théorie un manque important pour la photosynthèse.

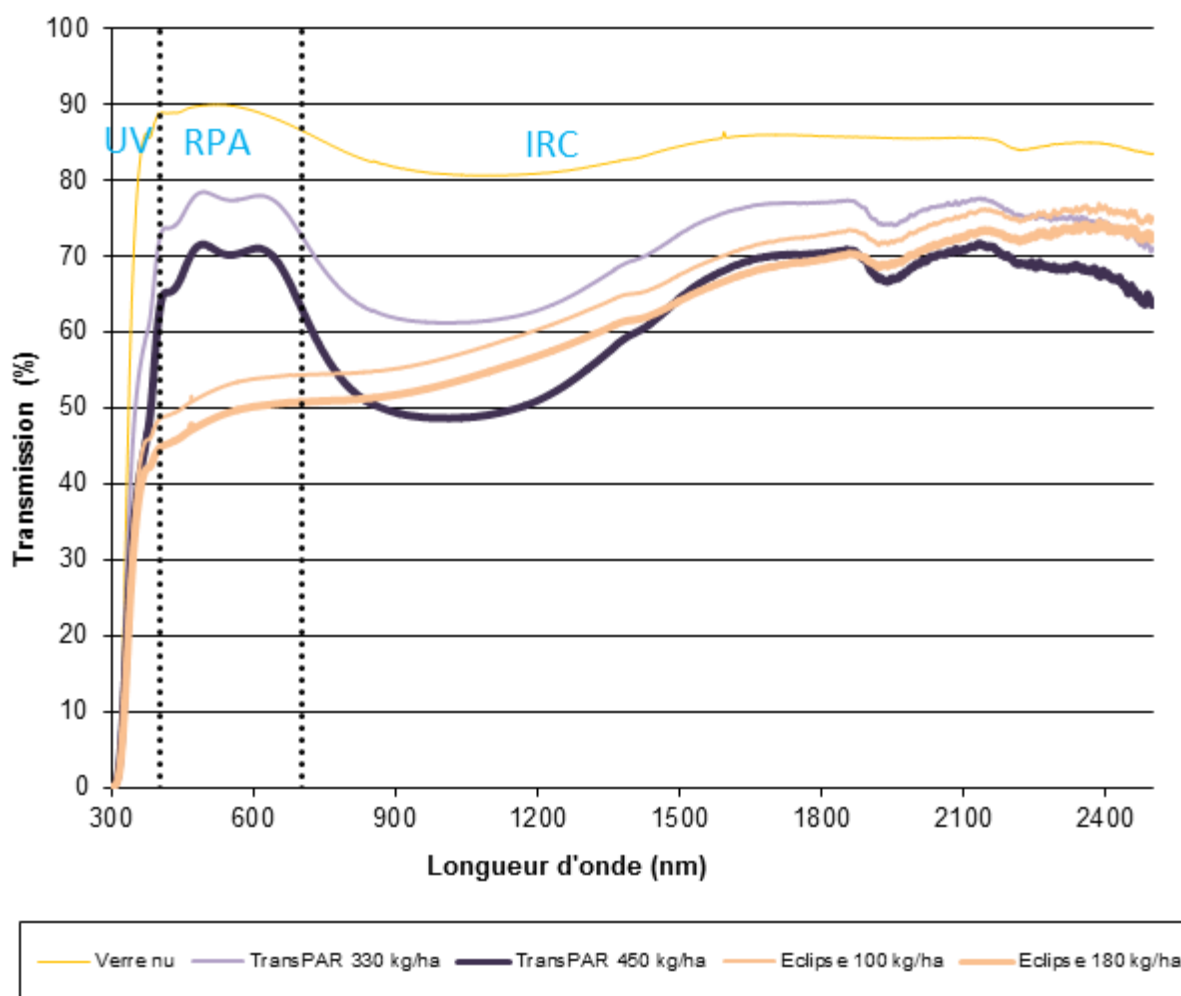


Figure 5 : Courbes de transmission du rayonnement pour une peinture classique (Eclipse) et un produit photo-sélectif aux IRC (TransPAR) à différentes doses et dilutions en pourcentage du rayonnement incident. Source : C.THIBAUD.

L'objectif est d'obtenir le même taux d'ombrage global avec TransPAR et Eclipse.

Le Tableau 5 présente les moyennes des pourcentages de transmission dans les différents domaines du spectre solaire (UV, RPA et IRC) à partir des données issues du laboratoire de SUDLAC. Avant application, le pourcentage de Rg transmis est de 83,3% car le verre ne transmet pas totalement le Rg. Le pourcentage de transmission du Rg est inférieur à celui du RPA et des IRC car le Rg comprend les UV de 300 à 400nm qui sont faiblement transmis. Il apparaît que les pourcentages de transmission de Rg lors de la première application sont théoriquement supérieurs de 6,85% pour la modalité TransPAR. A l'issue de la deuxième application, la transmission dans le Rg est proche (1,36% de différence) (Figure 5 et Tableau 5). A la suite de chaque application, la transmission dans le RPA est supérieure d'au moins 20% pour le TransPAR mais similaire dans l'IRC.

Tableau 5 : pourcentage de rayonnement moyen transmis dans le Rg, le RPA et l'IRC.
 Source : C.THIBAUD. Les moyennes et écart-types ont été calculées à partir des données de laboratoire ayant permis de tracer les courbes de la Figure 5.

	Avant application	Après la 1ère application (17-04-2013)			Après la 2ème application (6-04-2013)		
Produit et dose	Verre nu	Eclipse 100 (kg/ha)	TransPAR 330 (kg/ha)	TransPAR 330 (kg/ha) - Eclipse 100 (kg/ha)	Eclipse 180 (kg/ha)	TransPAR 450 (kg/ha)	TransPAR 450 (kg/ha) - Eclipse 180 (kg/ha)
% Rg transmis	83,3±9,6	63,36±12,1	70,21±10,1	6,85	60,17±12,1	61,51±11,2	1,34
% RPA transmis	88,9±0,9	52,40±1,8	76,55±1,7	24,15	48,73±1,9	68,96±2,4	20,23
%IRC transmis	83,8±1,9	67,08±7,8	70,80±6,0	3,72	63,93±8,1	61,94±8,4	- 1,99

3.2.3 Principale limite du système d'étude

L'utilisation de deux produits d'ombrage différents justifierait d'adapter l'irrigation en conséquence. En effet, en cas d'irrigation inadaptée, celle-ci peut se révéler un facteur limitant ne permettant pas de valoriser les qualités intrinsèques du produit testé. Par exemple, si la plante est sous-irriguée alors qu'elle reçoit beaucoup plus de RPA alors, elle risque de ne pas pouvoir utiliser cet avantage. Mais le système automatique d'irrigation de l'ensemble de la serre utilise l'humidité du substrat de la modalité Eclipse pour irriguer ce qui peut se révéler inadéquate pour les plantes poussant en TransPAR.

3.3 Variables étudiées

La partie suivante présente les variables microclimatiques et agronomiques suivies tout au long de l'étude. En dernière partie la méthode d'évaluation du coût de chaque solution d'ombrage est présentée.

3.3.1 Variables physiques (microclimatiques)

L'ensemble des variables sont enregistrées sur un pas de temps de 5 minutes. La précision des capteurs de Rg et du capteur d'hygrométrie est de ±5%. La précision du capteur de température est de 0,1°C.

3.3.1.1 Rayonnement extérieur

La serre Nord de l'exploitation est équipée en toiture d'une sonde de Rg (CM5, Kipp & Zonen). Cette sonde sert en temps normal pour la gestion automatisée de la conduite culturale. Ce sont les données recueillies par cette sonde déjà en place qui ont été utilisées.

3.3.1.2 Rayonnement intérieur :

Pour la durée de l'essai, un capteur de Rg (CM5, Kipp & Zonen) (Figure 7) et un capteur RPA (LI-190, Li-cor) ont été placés dans chaque compartiment. Ces capteurs mesurent le rayonnement dans les plages de longueurs d'onde de 300 à 2700 nm pour le capteur de Rg et de 400 à 700 nm pour le capteur RPA. Les capteurs ont été placés au-dessus du couvert végétal à 4,4 mètres de hauteur sur une platine en métal fixée à la structure de la serre (Figure 6). Les mesures ont été enregistrées en continu par une centrale d'acquisition autonome (21X Micrologger®, Campbell Scientific).

Toutes les 10 secondes, les centrales enregistrent un point de mesure. Puis toutes les 5 minutes, la moyenne des 30 dernières mesures est enregistrée.



Figure 6 : platine avec les capteurs de rayonnement au-dessus du couvert végétal. Source : C. THIBAUD



Figure 7 : capteur de rayonnement global. Source : C. THIBAUD

3.3.1.3 Température et humidité de l'air intérieur

Comme pour le Rg extérieur, les données recueillies par les sondes déjà en place pour la gestion climatique automatisée ont été utilisées (Figure 8). Dans chaque compartiment, une sonde de température et d'hygrométrie (SPFJ, Prosensor) placée dans un abri ventilé à 2,5 mètre de hauteur dans la végétation réalisent des mesures en continu.

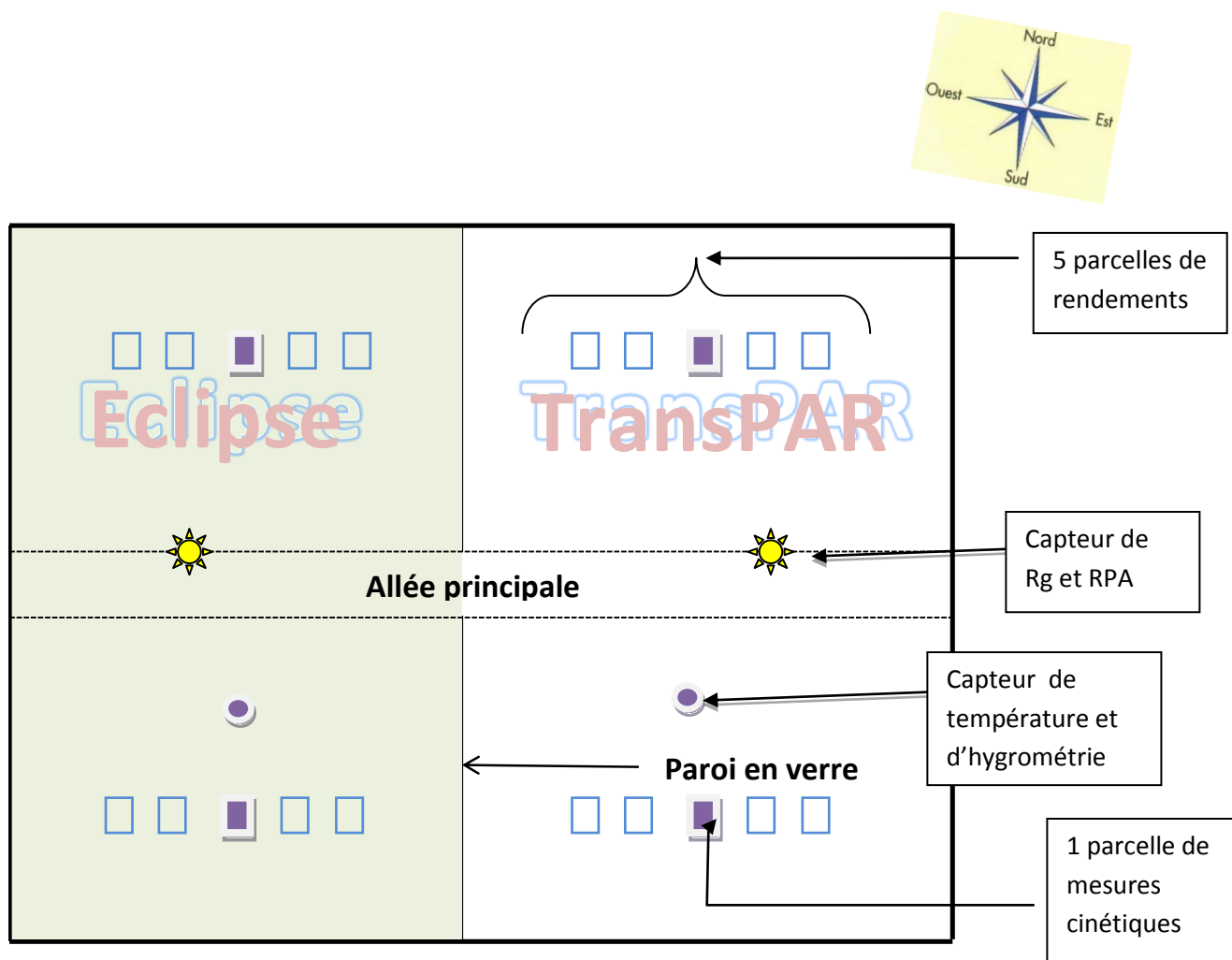


Figure 8 : Localisation des capteurs, parcelles de rendement et parcelles cinétiques dans la serre expérimentale. Source : C. THIBAUD

3.3.2 Variables Agronomiques

3.3.2.1 Croissance du végétal

3.3.2.1.1 Rendement

Le début de notation du rendement a débuté le 4 Avril 2013, quelques jours avant l'application des peintures. Cette mesure consiste en 2 récoltes hebdomadaires le Lundi et le Jeudi matin. La récolte s'est prolongée jusqu'au 29 Août. En culture de tomate sous serre, l'apex principal des jeunes plants est étêté très tôt pour laisser se développer deux axillaires secondaires qui constitueront les deux tiges principales de la plante. Les fruits ont été récoltés sur 100 tiges par modalité groupées par 10 au sein de 10 parcelles réparties dans différents endroits de la serre (Figure 8).

Les grappes sont récoltées à même maturité que celles récoltées par les ouvriers et destinées à la consommation. Lorsque le dernier fruit de la grappe tourne au rouge ou a dépassé ce stade alors la grappe est récoltée entièrement.

En plus du rendement total, des informations sur la qualité de la récolte ont été recueillies comme par exemple le nombre de fruits par grappe ou le type de dégât sur les fruits non-commercialisables.

3.3.2.1.2 Cinétique de croissance

- Echantillon d'étude :

Pour chaque modalité, 2 parcelles de rendements sont réutilisées pour faire cette notation. Les mesures sont donc faites sur 20 tiges par modalité.

- Fréquence

Une mesure hebdomadaire a été réalisée chaque Jeudi, du 2 Mai jusqu'au 25 Juillet. Les plants ont par la suite été ététés. Ainsi, la plante n'ayant plus la même cinétique de croissance du fait du ratio sources/puits qui n'est plus le même, il n'est plus utile de faire ce type de mesure.

- Variables mesurées :

En se basant sur le protocole de mesures réalisées au CTIFL et par les producteurs de Rougeline, le choix des variables mesurées a été le suivant : stade de floraison ; stade de récolte ; charge en fruit par bouquet ; allongement et diamètre de la tige ; distance-fleur apex ; longueur de feuille et largeur de feuille (Annexe I).

3.3.2.2 Fonctionnement de la plante

Un poromètre (AP4 de Delta-T) a été utilisé pour mesurer la conductance stomatique des feuilles. Sa précision est supérieure à 80% et 90%, respectivement dans les gammes de conductances de 5-800 mmol/m²/s et 800-1200 mmol/m²/s. Dans chaque modalité, 30 mesures ont été réalisées aléatoirement sur une feuille située à environ 30 cm de l'apex. Ces mesures ont été réalisées par temps ensoleillé. Quatre sessions de mesures ont été réalisées, les Jeudi 20 et 27 Juin ainsi que les 4 et 11 Juillet entre 13h et 15h. Cette plage horaire a été définie afin de se placer au moment où le Soleil est proche de son zénith pour avoir des mesures comparables dans les deux compartiments. L'objectif est d'observer la réaction des plantes aux moments où les températures sont les plus extrêmes.

3.3.2.3 Qualité des fruits

Cette partie présente les variables qui ont été utilisées dans l'étude de la qualité des fruits puis le protocole de récolte et sélection des fruits.

3.3.2.3.1 Composition des fruits

Pour apprécier la teneur en eau des fruits et le pourcentage de masse sèche des fruits, la masse fraîche et la masse sèche ont été recueillies, respectivement avant et après passage des fruits à l'étuve.

Différentes molécules contenues dans les fruits ont été extraites puis dosées par voie enzymatique. Le dosage a concerné en particulier la vitamine C.

3.3.2.3.2 Protocole de récolte et sélection des fruits

Les fruits destinés aux analyses de composition chimique ont été récoltés à 3 dates successives : le 17 Juin, le 1er et 15 Juillet.

A chaque récolte et dans chaque modalité, un lot de grappes est récolté de sorte à pouvoir sélectionner sur celles-ci de 30 à 36 fruits. Les grappes sont récoltées à maturité, c'est-à-dire à partir d'une coloration qui est la même que celle pour les mesures de rendement. Les fruits sélectionnés sont le 2^{ème} et/ou le 3^{ème} fruit de la grappe. La sélection se fait sur critère visuel en sélectionnant des grappes aussi mûres dans les deux modalités. Les fruits sont pesés individuellement de sorte à obtenir leur poids frais. A l'aide d'un chromamètre une mesure optique de coloration est réalisée pour chaque fruit directement à proximité de la zone symétriquement opposée au point d'attache du pédoncule (Figure 9). C'est une mesure complémentaire à l'estimation visuelle dont le but est d'apprécier plus précisément la maturité. En analyse qualité de la tomate, c'est l'espace couleur L*a*b* qui permet d'évaluer le degré de maturité du fruit. Cet espace, aussi appelé CIELAB, est actuellement l'un des plus utilisés pour mesurer la couleur des objets dans pratiquement tous les domaines : « L » mesure la clarté ; « a » et « b » mesurent la chromacité. Ils situent la couleur de l'objet sur un axe orthonormé.

En distinguant toujours les modalités, les fruits sont ensuite réunis par lots de 5 à 6 fruits pour constituer 6 lots homogènes. Sur chaque fruit sont prélevés deux tranches (Figure 9). On prend soin de retirer les graines et le gel de sorte à ne préserver que le péricarpe. Les tranches sont découpées finement et placées avec leur lot respectif dans un sachet en plastique qui sera conservé au congélateur à -80°C dans l'attente des analyses car de nombreuses molécules dont la vitamine C se dégradent avec la température.

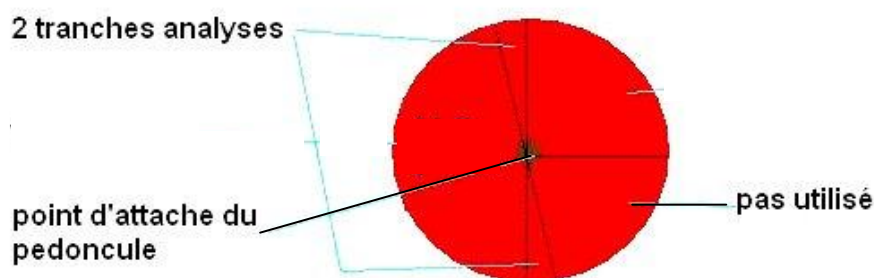


Figure 9 : Schéma d'un fruit de tomate désignant les parties utiles aux mesures d'analyse qualité. Source : C.THIBAUD

Les analyses chimiques ont ensuite été réalisées sur chaque lot en suivant les protocoles de laboratoire habituellement utilisés au laboratoire de l'INRA d'Avignon (Stevens, 2006 ; Gomez, 2007 ; Sérino, 2009). Pour résumer, la vitamine C, les sucres, les acides et les caroténoïdes ont été extraits et dosés sur 36 lots soit 18 lots par modalité à raison de 6

lots par modalité et par date. Le pourcentage de masse sèche a été obtenu pour chaque lot à partir du protocole suivant :

-autant de micro-tubes que de lots (ou échantillons) à analyser sont pesés.

-pour chaque échantillon environ 5mg de poudre fraîche sont prélevés et placés dans des micro-tubes de 2mL préalablement pesés. Cette poudre avait été obtenue auparavant en suivant les protocoles cités précédemment.

-on pèse ensuite les micro-tubes contenant la poudre puis ils sont placés à l'étude à 58°C durant trois jours. On pèse à nouveau les micro-tubes contenant alors de la poudre sèche. Le pourcentage de masse sèche est ensuite obtenu en calculant le ratio masse de la poudre sèche sur la masse de la poudre fraîche.

3.4 Analyses statistiques

Le logiciel R et le package fonctions inhp distribué par les professeurs de statistiques d'Agrocampus Ouest ont été utilisés réaliser les tests statistiques.

Après vérification du respect des conditions d'application des tests, c'est-à-dire la normalité et l'homoscédasticité des échantillons comparés, des ANOVA ont été réalisées au seuil de 1 ; 5 et 10% pour mettre en évidence la significativité ou non des différences observables entre les moyennes de ces échantillons. Ces seuils sont systématiquement précisés.

4 Résultats-Discussion

4.1 Impact des peintures sur l'environnement physique de la plante

4.1.1 Rayonnement

4.1.1.1 Une transmission différente du Rg selon le produit et la période

Les résultats de transmission du rayonnement global du Tableau 6 montrent qu'avant application des peintures, la transmission en Eclipse et TransPAR n'est pas totale, respectivement de 79% et 77%. Cette transmission initialement réduite de plus de 20% a plusieurs explications :

- les structures de la serre réduisent la transmission du Rg (Brajeul, 2001). En effet, au cours de la journée, à l'instar des plantes, les capteurs sont soumis à des ombres portées ce qui réduit le Rg qui leur est transmis.
- quel que soit le type de verre, celui-ci a un taux de transmission du Rg qui est toujours inférieur à 100% (Hemming, 2007).
- le toit de la serre présentait initialement un dépôt de poussière certainement du fait de la pollution atmosphérique. Mashonjowa (2009) a montré dans le cas d'une serre plastique que la transmission du Rg a été réduite de 15% après 6 mois uniquement du fait d'accumulation de particules sur la toiture. Ainsi cette dernière hypothèse pourrait principalement expliquer cette transmission initiale réduite.

Tableau 6 : Pourcentage de transmission du Rg selon la modalité lors de journées ensoleillées (Rg>2000J/cm²/j). L'ensemble des données de Rg de la 1^{ère} et 2^{ème} période ont été utilisées pour calculer ces valeurs. Source : C.THIBAUD

	Eclipse	TransPAR	TransPAR-Eclipse
Avant application	79%	77%	-2%
Après 1^{ère} application	60 ± 7%	65 ± 5%	+5%
Après 2^{ème} application	55 ± 2%	63 ± 1%	+8%

Après la première et la deuxième application, la transmission du Rg en Eclipse et TransPAR était respectivement de 60 et 65% puis 55 et 63% (Tableau 6) soit une baisse de transmission de 19 et 5 points de pourcentage en Eclipse et une baisse de 12 et 2 points en TransPAR respectivement après chaque application. On en déduit donc que la première application a été plus efficace en terme d'occultation du Rg. Le taux de transmission en modalité TransPAR est même resté identique (Tableau 6 et Figure 11). En modalité Eclipse, en comparant aux données théoriques du paragraphe 3.2.2, il est cohérent que la seconde application occulte le Rg proportionnellement moins que la première. En effet, au laboratoire de Sudlac, la première application a permis une baisse de 20% de transmission et la seconde une baisse de seulement 3% de transmission pour une dose de produit en deuxième application étant égale à 4/5ème de la première. En TransPAR, la baisse de transmission de 12% après la première application est cohérente avec celle du laboratoire qui est de 13% mais la seconde application n'a pas permis de réelle baisse de la transmission alors qu'elle est de 10% au laboratoire. L'objectif d'obtenir une même transmission du Rg n'a donc pas été atteinte. Quelle que soit la peinture, il existe un effet seuil au-delà duquel il n'est plus utile d'en ajouter car l'occultation de la transmission du Rg est proportionnellement de moins en moins efficace en fonction de l'augmentation de la dose.

Le phénomène observé ici pourrait correspondre à cet effet de seuil mais celui-ci ne se manifeste normalement qu'à partir de 450-500 kg/ha de TransPAR alors qu'on l'observerait

dans notre situation à 350kg/ha. L'explication tiendrait à la différence d'application entre le laboratoire et le terrain (Kittas, 1999). En effet, au laboratoire, la totalité de la dose est appliquée en un seul passage à l'aide d'un pulvérisateur manuel ce qui occasionne un ruissellement induisant des pertes. Tandis que par hélicoptère, la peinture est appliquée en plusieurs passages successifs, ce qui permet entre-temps aux différentes sous-couches de sécher et limite ainsi les pertes.

De plus, par hélicoptère la répartition est plus grossière qu'à la main avec pour conséquence des zones de la toiture moins couvertes par le TransPAR (notamment au niveau du capteur en TransPAR), et ce d'autant plus que la dose de deuxième application a été faible pour la modalité TransPAR. Autrement dit, la dose présente au niveau du capteur ne correspondrait pas tout à fait à celle calculée pour l'ensemble de la modalité.

Après la première application, la Figure 10.A montre que la différence de transmission de 4% se produit entre 12h et 16h. Après la deuxième application, la différence de transmission de 9% s'observe le matin mais aussi l'après-midi et cette fois-ci de façon plus nette. Pour la première période, ces résultats concordent avec ceux observés lors d'un essai similaire réalisé en 2012 au CTIFL de Carquefou incluant les produits Eclipse et TransPAR. J'avais calculé que plus le Soleil était à proximité de son zénith, plus le taux d'accroissement de transmission du Rg en TransPAR était élevé par rapport à celui en Eclipse. Néanmoins ceci est moins vrai en 2^{ème} période, puisque l'écart même après 17h reste élevé (Figure 10.B).

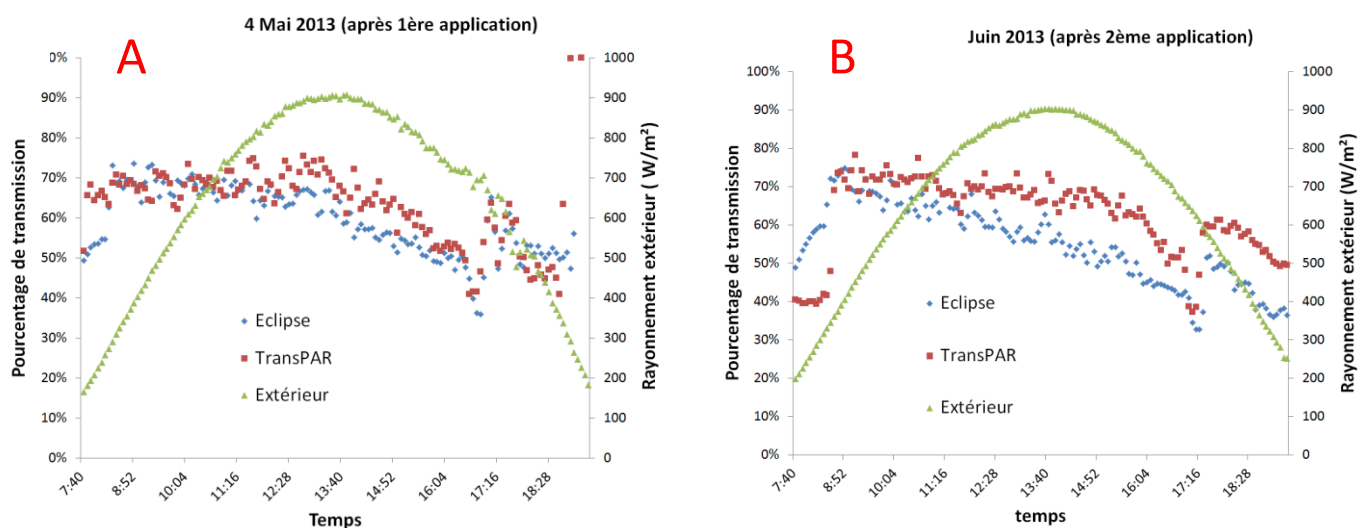


Figure 10 : Pourcentage de transmission du Rg après la 1^{ère} application (graphe A) après la 2^{ème} application (graphe B). Source : C.THIBAUD

4.1.1.2 Evolution du taux de transmission du Rg au cours du temps

La Figure 11 présente l'évolution du taux de transmission dans chaque modalité sur la durée de l'essai en distinguant les périodes après la 1^{ère} application et après la 2^{ème} application. L'évolution des taux de transmission permet d'observer s'il y a lessivage ou non des peintures au cours du temps. Pour cela, il est nécessaire de ne retenir que les journées ensoleillées pour lesquelles le taux de transmission est relativement stable alors que les journées ombragées montrent des taux très variables selon l'épaisseur de la couverture nuageuse et la présence ou non de pluie.

En 1^{ère} période, jusqu'à la mi-Mai, le taux de transmission en Eclipse est inférieur à celui en TransPAR puis la transmission en Eclipse augmente jusqu'à égaler celle en TransPAR (Figure 11.A). Les droites de tendances du taux de transmission journalier confirment que celui-ci augmente en Eclipse plus rapidement qu'en TransPAR ce qui pourrait s'expliquer par

un lessivage plus rapide de l'Eclipse par rapport au TransPAR. En effet, l'association pigment-résine de l'Eclipse est moins stable que celle du TransPAR. Or en 1^{ère} période, de nombreuses journées de pluies ont eu lieu et pourraient donc être responsables de ce lessivage.

Durant la 2^{ème} période, majoritairement ensoleillée, le taux de transmission est resté très stable pour les deux modalités (Figure 11, B) indiquant la bonne tenue des peintures.

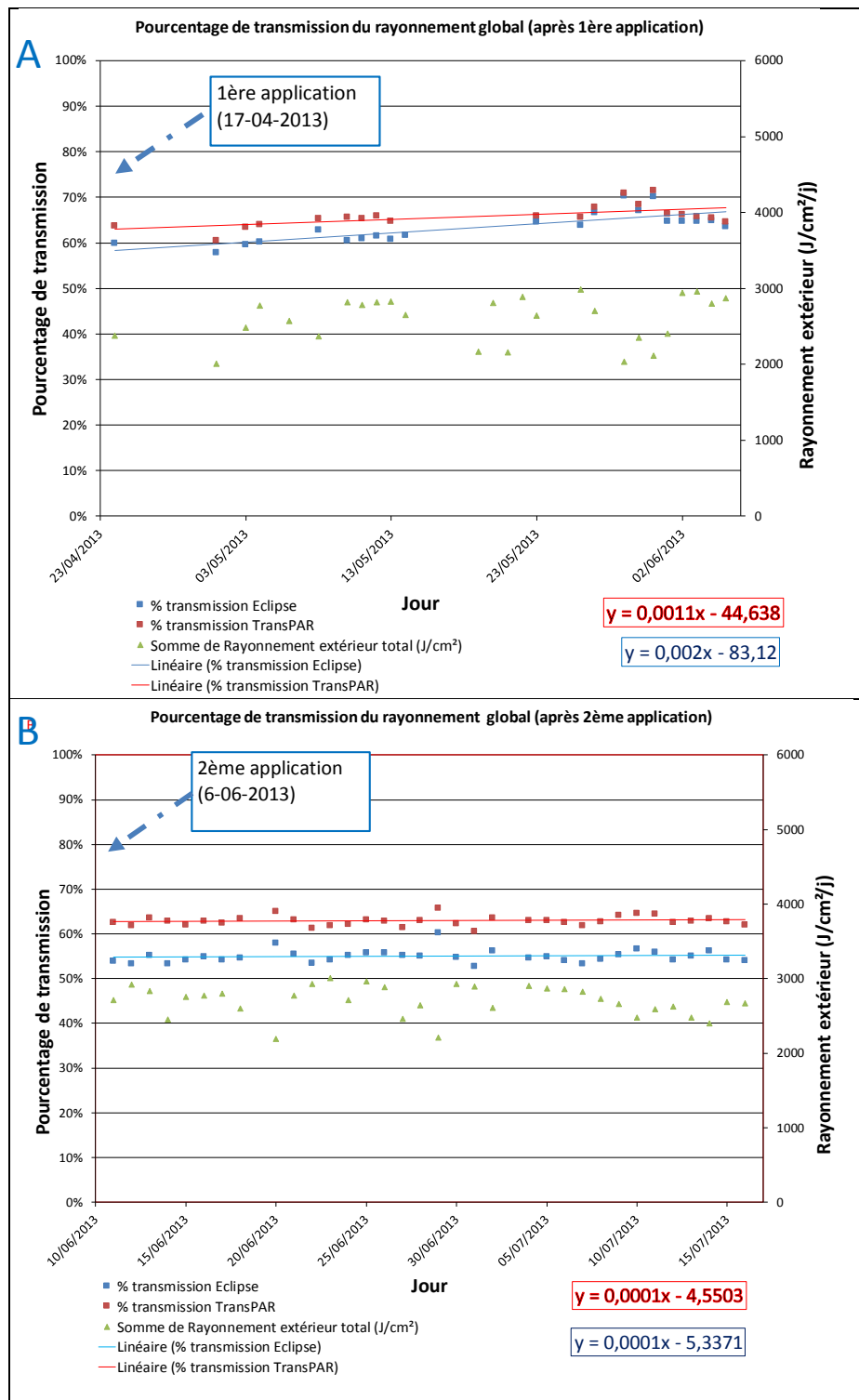


Figure 11 : Evolution du pourcentage de transmission du Rg sur la période de 1^{ère} application et la période de 2^{ème} application. Seules les journées avec plus de 2000J/cm²/j de Rg ont été retenues. Source : C.THIBAUD

4.1.1.3 Rayonnement RPA

Le RPA de la 1ère période n'est pas présenté car les données des capteurs présentent des incohérences. Pour utiliser ces données, il faudrait avant tout comprendre l'origine du problème, vérifier si les données de certaines journées sont tout de même utilisables pour représenter fidèlement le RPA transmis lors de la 1ère période. Du fait du temps à disposition, il a été décidé de ne présenter que les données de la 2ème période car elles sont plus fiables.

D'autre part, nous ne disposons pas de capteurs RPA à l'extérieur. Il n'a donc pas été possible de calculer le pourcentage du RPA extérieur transmis en TransPAR ou en Eclipse. Lors d'une journée ensoleillée et d'une journée nuageuse, le Tableau 7 montre que le RPA moyen est supérieur en TransPAR par rapport à l'Eclipse (respectivement 197,3 contre 154,8 W.m⁻² et 116,5 contre 94,6 W.m⁻²) soit en pourcentage 27% de plus par journée ensoleillée et 23% par journée couverte.

Tableau 7 : RPA moyen après la seconde application lors de deux journées, une journée ensoleillée (18/06/2013) et une journée couverte (19/06/2013). Source : C.THIBAUD

Modalité		18/06/2013 (ensoleillée)	19/06/2013 (couverte)
RPA moyen (W.m ⁻²)	Eclipse (180kg/ha)	154,8 ± 82,3	94,6 ± 62,1
	TransPAR (450kg/ha)	197,3 ± 101,5	116,5 ± 73,7

La Figure 12 présente l'évolution du RPA au cours des deux journées ensoleillées et nuageuses présentées précédemment. Lors d'une journée ensoleillée ou nuageuse, la transmission du RPA en TransPAR est supérieure tout au long de la journée. De plus, comme pour le Rg, l'écart entre les deux courbes de transmission est plus important autour du midi solaire (14h administratif) lors de la journée ensoleillée entre 11h et 16h (Figure 12.A). Il se pourrait que cette transmission supplémentaire du RPA en milieu de journée explique principalement le niveau de transmission du Rg plus élevé en TransPAR.

La chute de transmission observable entre 16h30 et 17h30 correspond à une ombre de structure. Elle est aussi observable sur les courbes présentant le Rg (Figure 10).

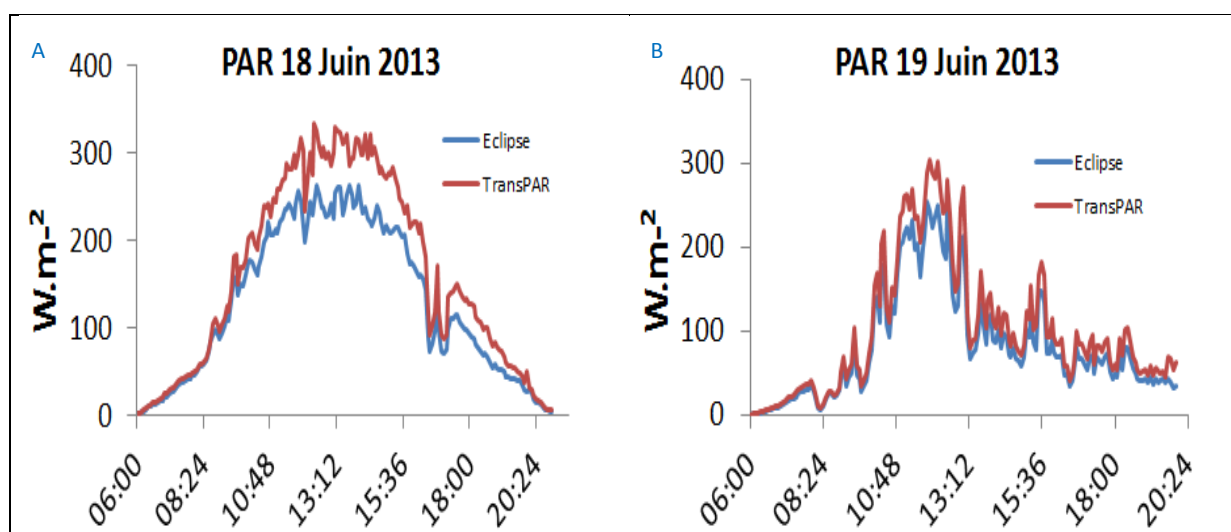


Figure 12 : RPA instantané lors des journées du 18 Juin (A) et du 19 Juin (B). Source : C.THIBAUD

4.1.2 Climat

4.1.2.1 Impact sur la température

Le choix a été fait d'étudier la température et l'hygrométrie au moment critique de la journée, c'est-à-dire sur une période de 6 heures autour du midi solaire qui est à 14H. L'intérêt est d'éviter de lisser les moyennes ce qui aurait été le cas en utilisant l'ensemble des données journalières. En effet, à l'échelle d'une journée de 24h, les valeurs moyennes ne permettent pas d'observer si la culture se trouve dans une situation de stress à un moment donné.

En première période, le Tableau 8 montre que la température moyenne entre 11h et 17h est supérieure en Eclipse de 0,7°C (p-value<0,1). De plus, la température est plus élevée aussi bien lors d'une journée couverte qu'ensoleillée (Figure 13A et Figure 13C). Cette différence est étonnante puisque le Rg en TransPAR était supérieur de 2 à 5% par rapport à la modalité Eclipse. Néanmoins, plusieurs hypothèses pourraient expliquer cette différence. Les végétaux utilisent majoritairement le RPA pour la transpiration. Or, il se trouve que d'après les données théoriques (paragraphe 3.2.2), ce dernier était probablement plus élevé durant la 1^{ère} période à l'instar de la 2^{ème} et aurait donc favorisé un refroidissement supérieur au réchauffement induit par la transmission plus élevée du Rg en TransPAR.

En 2^{ème} période, la température moyenne a été identique (Tableau 8). On peut néanmoins remarquer que la température en TransPAR a été légèrement supérieure lors de la journée ensoleillée du 13 Juin (Figure 14.D).

Tableau 8 : T et DH moyens. Les moyennes sont calculées entre 11h et 17h à partir de l'ensemble des données journalières recueillies après la première et la deuxième application. s = significatif, ns = non significatif, *significatif au seuil de 10%.

Source : C.THIBAUD

	Variable	Eclipse	TransPAR	Significativité
Après 1 ^{ère} application	T (°C)	22,1 ± 2,2 a	21,4 ± 2,2 b	*
	DH (g/m ³)	6,2 ± 2,4 a	5,6 ± 2,2 a	ns
Après 2 ^{ème} application	(T °C)	28,1 ± 2,3 a	28,4 ± 2,5 a	ns
	DH (g/m ³)	8,9 ± 2,4 b	9,8 ± 3,0 a	*

4.1.2.2 Un impact sur le déficit hydrique en deuxième période

Après la première application, aucune différence significative de déficit hydrique n'est observée (Tableau 8). Sur la Figure 13.A, lors de la journée couverte du 25 Avril, on observe tout de même un DH supérieur en Eclipse entre 11h et 17h. Sur la Figure 13.C, lors de la journée ensoleillée du 4 Mai, le DH en Eclipse est supérieur sur l'ensemble de la journée en particulier de nuit. Cet écart de nuit est étonnant. En effet, les ouvrants de toiture étant fermés la nuit, les deux modalités sont alors confinées de la même manière et il ne devrait pas apparaître une telle différence.

Après la deuxième application, on remarque que le DH, 8,9 g/m³ en Eclipse et 9,8 g/m³ TransPAR a été supérieur à la valeur optimale de 5 à 6 g/m³ signifiant que dans les deux compartiments les plantes se sont retrouvées en situation de stress au cours de la journée. Néanmoins, le déficit hydrique en TransPAR a été supérieur de 0,9 g/m³ en moyenne (p-value<0,1). Sur la Figure 13.D, lors de la journée ensoleillée du 13 Juin on observe en effet que c'est durant le milieu de journée que cette différence se crée. Néanmoins, celle-ci ne s'observe pas lors des journées couvertes comme celle du 19 Juin.

Mais durant la période estivale, ce sont bien les journées ensoleillées qui ont dominé, leur impact est donc prépondérant sur le résultat du test statistique.

Ce résultat concorde avec ceux présentés dans la littérature. En effet, lors d'un essai comparant une PC à un témoin nu, le déficit hydrique était inférieur avec la PC car la transpiration de la culture était plus élevée. La PC laissant passer moins de RPA, la température de la culture était moins élevée que la température de l'air si bien que l'énergie sensible de l'air apportée aux plantes a plus que compensé la réduction d'énergie solaire par rapport au témoin nu, leur permettant ainsi une transpiration et un refroidissement supérieur (Baille, 2001). De plus, dans un essai comparant un écran photo-sélectif aux IRC et un témoin blanchi, Stanghellini (2011) rapporte que le déficit hydrique a été légèrement plus élevé avec la peinture photo-sélective.

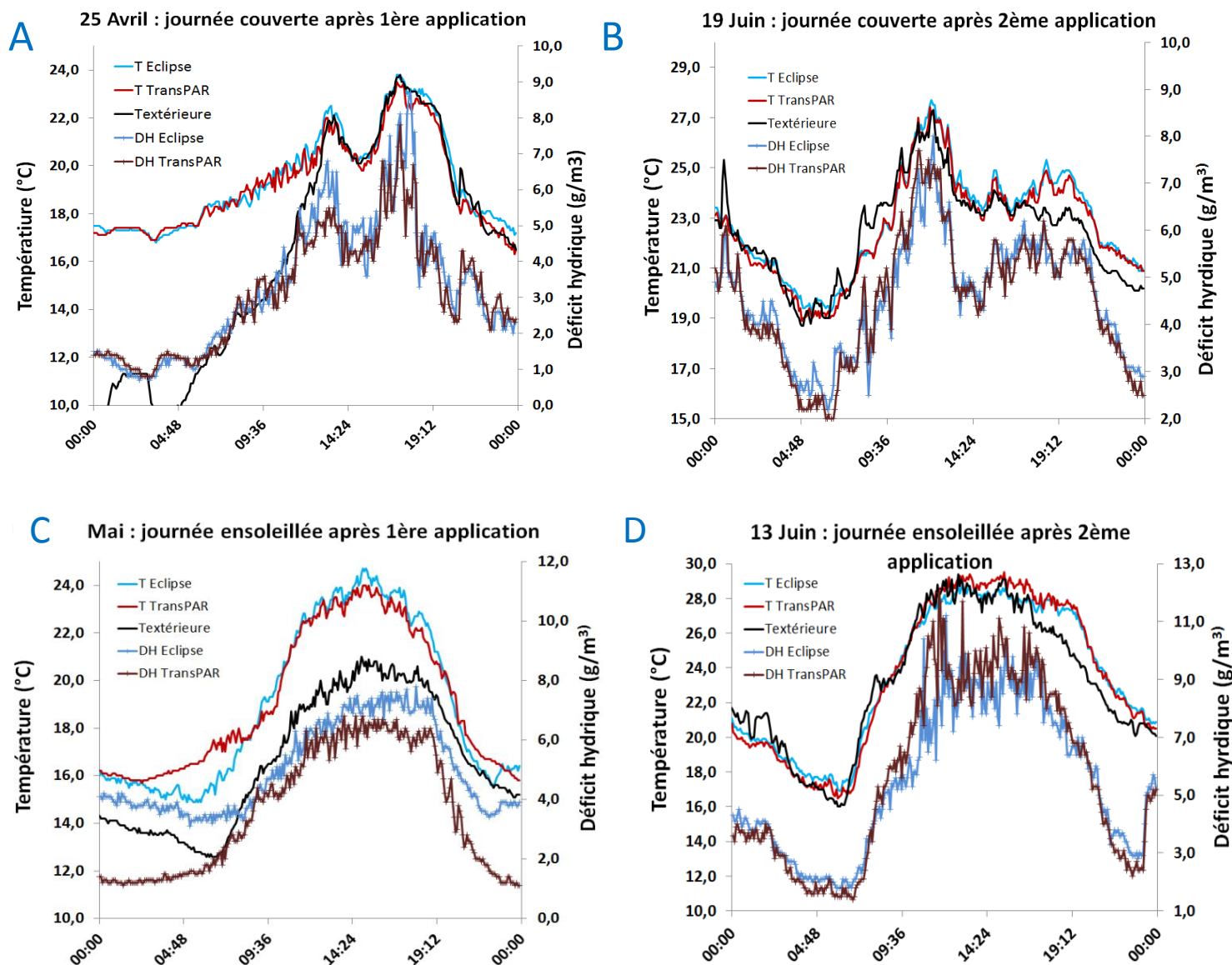


Figure 13 : T et DH lors de quatre journées. Deux journées nuageuses (A et B) et deux ensoleillées (C et D). Après première application (A et C) et après deuxième application (B et D). Source : C.THIBAUD

Synthèse de la partie 4.1 : Les transmissions du Rg et du RPA ont été différentes en fonction de la période d'application et entre les modalités. La transmission du Rg a été plus élevée en TransPAR par temps ensoleillé et ce plus particulièrement aux environs du midi solaire.

Les variables climatiques de température et DH ont été différentes selon la modalité et en fonction de la période. Ces différences de transmission du rayonnement et de climat ont pu avoir un impact sur la physiologie de la plante.

4.2 Impact des peintures sur la physiologie de la plante

4.2.1 Développement de la plante

4.2.1.1 Interaction entre produits d'ombrage et rendement

Le Tableau 9 montre que le rendement final considérant uniquement les grappes et le rendement total (grappe et vrac) ne sont pas significativement différents. Le poids moyen des fruits n'est pas non plus significativement différent.

Les grappes constituent plus de 95% du rendement total dans les deux modalités. Le nombre de fruits par grappe est un critère important puisque le cahier des charges exige en fonction de la catégorie (catégorie 1 ou extra) un certain nombre de grappes à trois, quatre ou cinq fruits et plus. La régulation sur la grappe se fait à cinq fruits car elles sont mieux valorisées. Les récoltes contiennent des grappes à moins de cinq fruits en raison de divers problèmes culturaux :

-pour de multiples raisons, la pollinisation d'une ou plusieurs fleurs du bouquet (ou grappe) peut échouer les faisant ainsi avorter ou être partielle donnant ainsi des fruits difformes ou trop petits.

-un ou plusieurs fruits ont été touchés par des microfissures prononcées ou du BER.

-certains fruits n'ont pas atteint la bonne maturité lors de la récolte, il est alors nécessaire de les séparer du bouquet. Ils rejoignent ainsi le vrac.

Par ailleurs, le pourcentage de grappes à 3, 4, 5 ou 6 fruits est identique. Les deux modalités d'ombrage ont donc permis une protection équivalente des bouquets.

Tableau 9 : Rendement final grappe, vrac, total et qualité des grappes récoltées (nombre de fruits par grappe). L'ensemble des récoltes de la semaine 16 à 34 ont été utilisées. Ns = non significatif. (-) = aucun test statistique réalisé pour cette variable. Source : C.THIBAUD

	Rdt grappe kg / m ²	Poids moyen (g)	% grappe s à 3 fruits	% grappe s à 4 fruits	% grappe s à 5 fruits	% grappe s à 6 fruits	Rdt vrac kg/ m ²	Rdt total (kg/m ²)	% grappe s
Eclipse	30,06 ± 1,76	136,7 ± 7,2	4%	11%	84%	1%	1,16 ± 0,05	31,21± 0,30	96,30
TransPAR	29,78 ± 1,43	134,0 ± 7,4	5%	10%	83%	2%	1,27 ± 0,06	31,05 ± 0,29	95,92
Significativité	ns	ns	-	-	-	-	ns	ns	-

La Figure 14 montre une variation du rendement total et du poids moyen de semaine en semaine (graphiques A et B). Le rendement total varie globalement de la même façon dans les deux modalités (Figure 14.A). De la semaine 14 à 29, il augmente avec l'augmentation du rayonnement, de la température de jour et de la température de nuit. A partir la semaine 30, à l'instar du rayonnement et des températures de jour et de nuit qui baissent après avoir atteint leurs valeurs maximales (entre 18000 et 19000 J/cm²/semaine pour le rayonnement et entre 28 et 28,5 °C pour la température) (Figure 14.C) le rendement diminue.

La Figure 14.B indique un poids moyen inférieur en TransPAR avant même la première application, écart qui se réduit après la première application jusqu'à la semaine 23 avec un dépassement de la modalité Eclipse par la modalité TransPAR durant les 2 semaines

suyvantes montrant que la vitesse d'augmentation du poids moyen est plus rapide en TransPAR qu'en Eclipse. Par la suite, le poids moyen en TransPAR repasse sous Eclipse jusqu'à la fin de l'essai. On remarque que le poids moyen en TransPAR repasse sous Eclipse deux semaines et demi après la 2^{ème} application après laquelle le Rg était bien supérieur en TransPAR induisant certainement le DH supérieur en TransPAR en 2^{ème} période et présenté précédemment (Tableau 8 et Figure 14.D). En effet, on observe que juste après la deuxième application, le DH de jour devient supérieur en TransPAR jusqu'à la fin de l'essai (Figure 14.D). Or, un DH plus élevé induit en général un calibre des fruits plus petit.

D'autre part, quelle que soit la modalité, on peut constater une baisse du poids moyen lors des semaines 30, 31 et 32 à relier aux températures moyennes supérieures à 25 degrés de jour lors des semaines 28 à 31 dans les deux modalités.

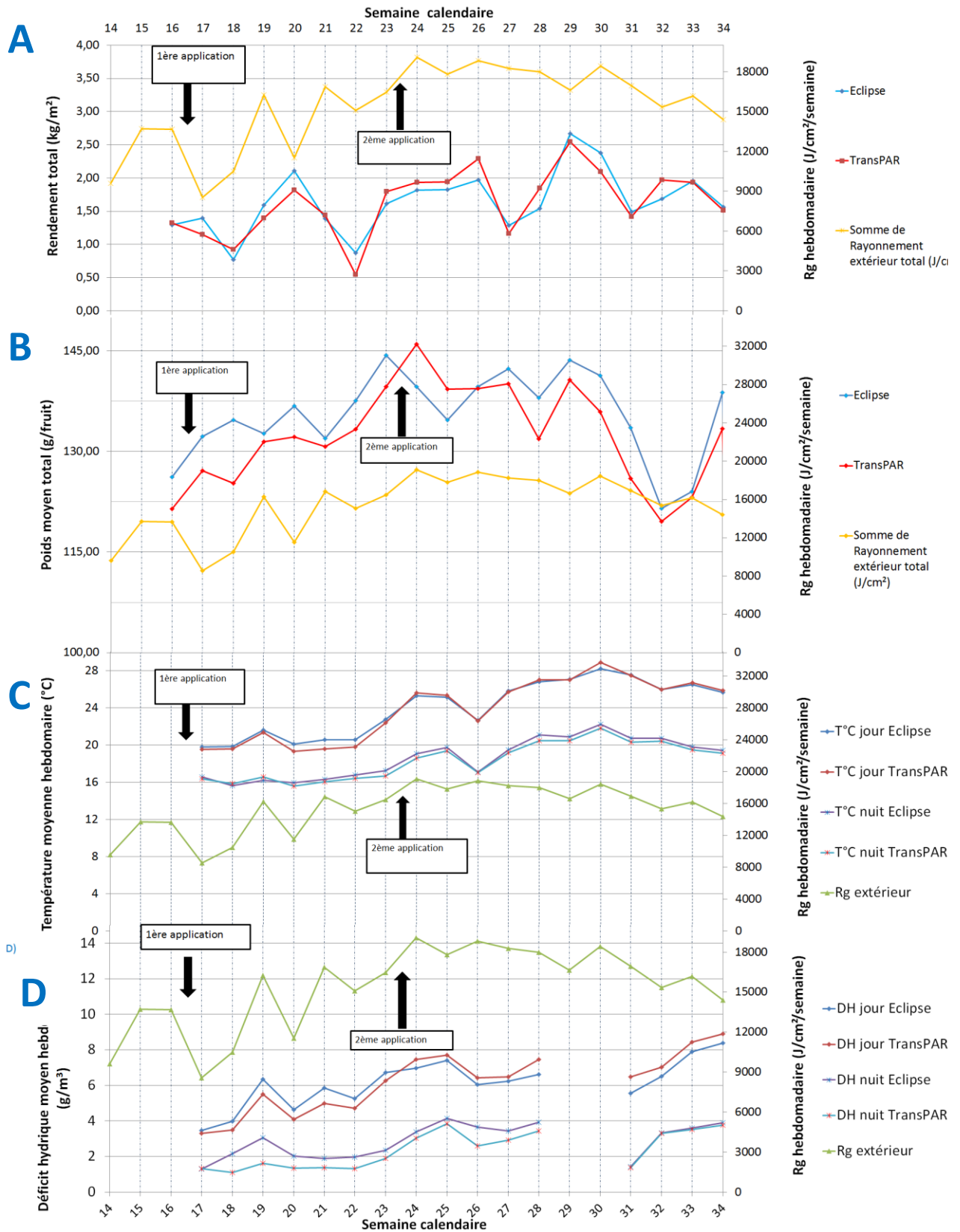


Figure 14 : Rendement et poids moyens hebdomadaires totaux (graphes A) et B)). Température et déficit hydrique moyens hebdomadaires de jour et de nuit (graphes C) et D)). Le jour et la nuit sont définis par les plages horaires respectives de 7h à 21h et de 21h à 7h. Source : C.THIBAUD

4.2.1.2 Interaction entre cinétique de croissance et produit d'ombrage

Les mesures biométriques réalisées du début de l'expérimentation à la dernière semaine de Juillet montrent des résultats différents selon les variables analysées.

La charge en fruit, le nombre de bouquets récoltés, le diamètre de tige et le nombre de bouquets en développement ont évolué de façon similaire dans les deux modalités (Annexe X).

La croissance des plants a aussi été identique (Annexe IX). Par contre la distance fleur-apex a été supérieure en Eclipse du 20 Juin au 19 Juillet. De plus, au 26 Juillet, la longueur moyenne des feuilles en TransPAR était plus faible. Ces différences traduisent le caractère plus génératif de la modalité TransPAR et est à relier au DH et au Rg supérieur en TransPAR durant cette période. En effet, des plants soumis à un DH et un rayonnement élevé fleurissent plus près de l'apex et ont des feuilles plus courtes. De plus, visuellement, la densité de feuillage en TransPAR est apparue moins dense en TransPAR dès début Juin bien que les mesures ne le montrent pas. La localisation des parcelles de mesures en milieu de parcelle alors que la densité de feuillage présentait un gradient croissant en partant de l'allée centrale au centre de la parcelle pourrait expliquer cette différence entre les notations et les observations à l'œil nu. Lors d'un essai sur culture de concombres au CTIFL de Carquefou en 2012, les plants en TransPAR avaient aussi un caractère plus génératif par rapport à la modalité Eclipse.

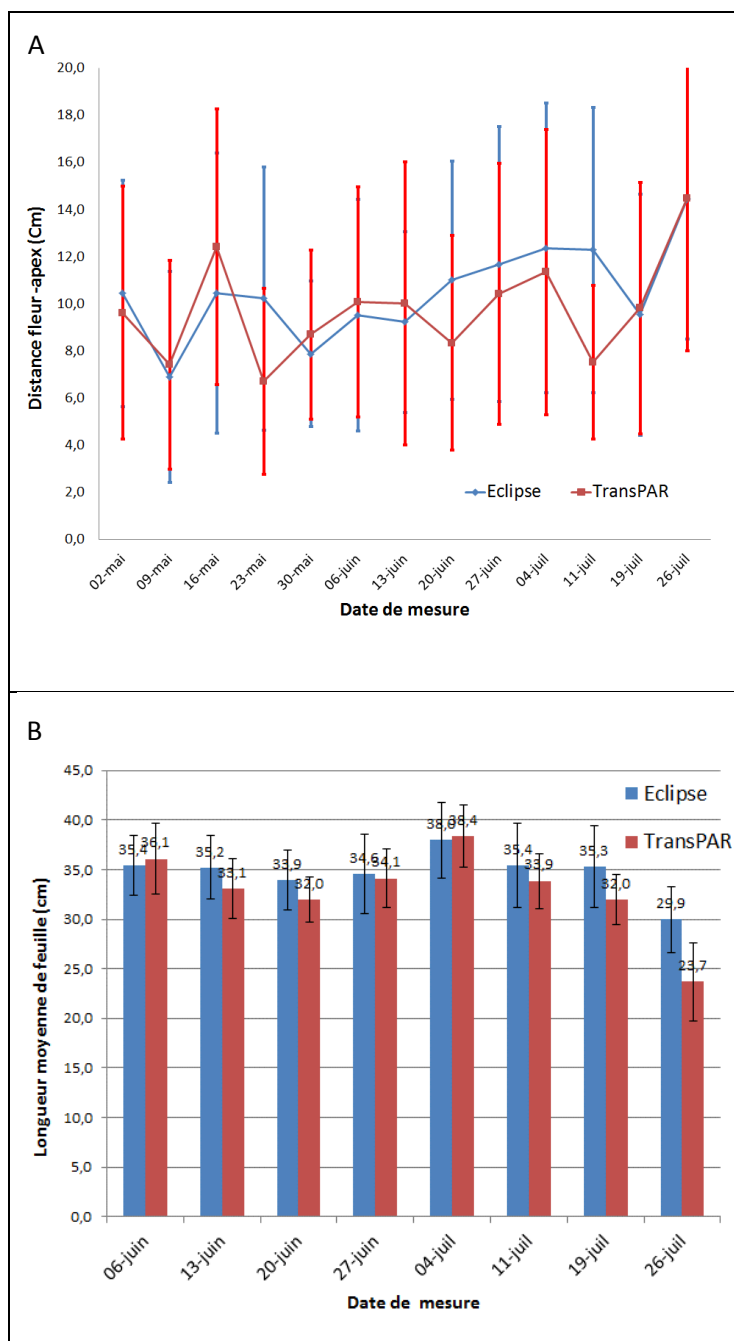


Figure 15 : Evolution de la distance fleur-apex (A) et longueur de feuille (B) au cours du temps. Source : C.THIBAUD

4.2.2 Echanges gazeux (porométrie)

Lors de la seconde période, la conductance stomatique en Eclipse s'est avérée en moyenne plus élevée d'environ 110 mmol/s/m² par rapport à celle en TransPAR (Tableau 10). Ce résultat est en accord avec la littérature. En effet, Baille (2001) a montré sur une culture de

roses stressées par un excès de rayonnement qu'une application de peinture de blanchiment avait permis une augmentation de la conductance stomatique quelques jours après l'application. Ainsi, la baisse du rayonnement transmis a permis de supprimer le stress auquel la culture était soumise. Il est possible que le rayonnement supplémentaire en TransPAR soit excessif aux environs du midi solaire par rapport aux valeurs des autres variables de l'environnement telles que le CO₂ ou le DH et soit responsable de la fermeture des stomates. En effet, du fait de l'absence d'injection de CO₂, sa concentration dans l'air ambiant ne dépasse pas 400ppm. De plus, au midi solaire le DH est supérieur à 9 g/m³ (Figure 13.D) dépassant la plage optimale de DH de 5 à 6g/m³. Il est par ailleurs reconnu que l'augmentation de l'hygrométrie et du CO₂ peuvent permettre à la culture de mieux valoriser le RPA (Körner, 2008).

Les stomates permettent les échanges de gaz (CO₂, O₂) avec l'environnement. Ainsi, une conductance stomatique plus faible peut induire une activité photosynthétique de plante réduite car l'oxygène est libéré plus difficilement et le CO₂ pénètre moins rapidement. Par conséquent, le potentiel photosynthétique espéré par la transmission de rayonnement supplémentaire est affecté. Un meilleur contrôle du DH, de l'irrigation et un apport de CO₂ pourraient probablement permettre une photosynthèse accrue sous TransPAR et l'obtention d'un rendement plus élevé.

Tableau 10 : Conductance stomatique lors de la journée du 4 Juillet. ** = différence significative au seuil de 5% (ou p-value<0,05). Source : C.THIBAUD

	Eclipse	TransPAR	Significativité
Conductance stomatique (mmol/s/m²)	772,1 ± 176,8 a	658,9 ± 143,8 b	**

Bien que le rayonnement RPA ait été plus élevé en TransPAR lors de la mesure (Figure 16), les stomates étaient en moyenne moins ouverts. L'ouverture stomatique dépend en partie de l'hygrométrie ambiante. Durant cette période, le DH plus élevé en TransPAR pourrait expliquer cette conductance en moyenne plus faible.

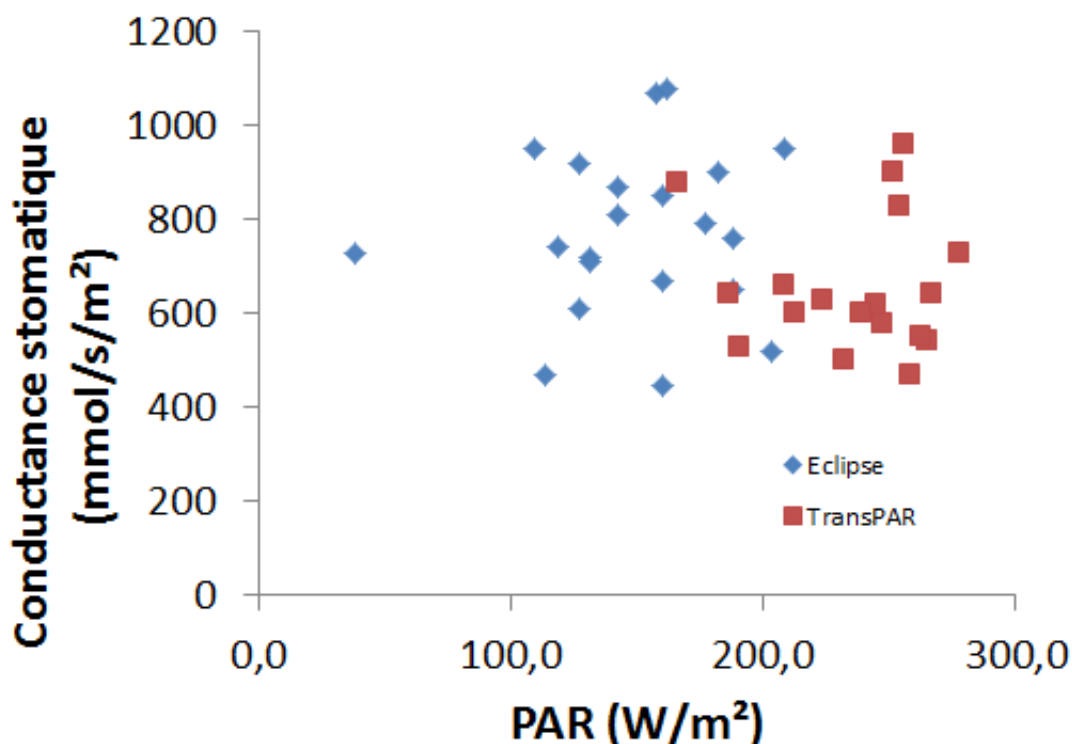


Figure 16 : Conductance stomatique en fonction du RPA transmis et selon la modalité (entre 13h et 15h le 4 Juillet). Source : C.THIBAUD

4.2.3 Qualité du fruit

Le Tableau 11 montre qu'aux deux premières dates de récolte, les fruits en Eclipse et TransPAR avaient un niveau de maturité similaire puisque les résultats de l'espace L*a*b sont identiques entre les deux modalités. Pour la troisième date de récolte (15/07/2013), la sélection des fruits n'a par contre pas permis d'obtenir des échantillons de même maturité. Pour cette dernière date, il est donc difficile d'évaluer si les différences observées sont dues au facteur testé ou à une différence de stade de maturité.

Même si la différence n'est pas significative, on peut remarquer que les fruits issus de la modalité TransPAR ont un pourcentage de masse sèche systématiquement plus élevé à ceux issus de la modalité Eclipse.

Les fruits récoltés le 17 Juin ont des taux de glucose, fructose, acide citrique et malique supérieurs en TransPAR. Ceux récoltés le 1^{er} juillet ont une teneur très significativement supérieure en vitamine C totale pour la modalité TransPAR par rapport à la modalité Eclipse. Le niveau de maturité des fruits étant le même, on peut donc bien attribuer cette différence de teneur en vitamine C, sucres et acides à la modalité et non à une différence de maturité. Concernant les tomates récoltées le 17 Juin, elles se sont développées majoritairement avant la 1^{ère} application. En effet, il faut compter entre 8 et 9 semaines entre le stade de la nouaison et celui de la récolte. Ainsi, elles ont majoritairement subi le rayonnement et le climat de la première période alors que les tomates récoltées le 1^{er} Juillet et le 15 Juillet ont été exposées d'avantage aux conditions de la seconde période. Or, le Rg affecte significativement la teneur en vitamine C des tomates : plus les plants et les fruits de tomates sont exposés à un Rg élevé, plus leur teneur en vitamine C est élevée (Massot, 2010 et Gest, 2012). Durant la 2^{nde} période, le Rg extérieur a en effet été plus important par rapport à la 1^{ère} période. De plus, sa transmission en TransPAR a été plus élevée par rapport à celle en Eclipse. Par ailleurs, le Rg atteignant directement le fruit affecte plus sa teneur en vitamine C que celui atteignant les feuilles (Gautier, 2009). Or, comme les plants étaient plus

générateurs en TransPAR, les fruits ont été certainement exposés à un supplément de rayonnement car le feuillage a moins occulté le Rg atteignant les fruits. Néanmoins, il n'est pas possible d'affirmer si le surplus de RPA est à lui seul responsable de cette différence de teneur en vitamine C puisque la transmission de Rg n'était pas la même dans les deux modalités.

Tableau 11 : Analyses chimiques des fruits récoltés à 3 dates durant l'essai. %MS = pourcentage de masse sèche dans les fruits. Vitc tot = vitamine C totale des fruits. Les lettres a et b indiquent que les moyennes sont significativement différentes au seuil de 1% (*), 5% (**) et 10% (*). Source : C.THIBAUD**

Modalité	17-06		01-juil		15-juil	
	Eclipse	TransPAR	Eclipse	TransPAR	Eclipse	TransPAR
L	39,1±0,8	39,0±1,0	37,2±1,9	37,9±1,2	38,09±3,2b	38,8±2,8a*
A	22,7±2,3	22,6±2,9	22,3±2,2	22,3±2,4	24,8±2,5a***	22,1±2,3b
B	22,2±1,4	22,5±1,5	21,4±1,5	20,6±1,3	23,16±1,9a**	22,04±1,7b
%MS	5,99	6,22	5,98	6,15	5,9	6,04
vitC tot (mg/100g MS)	225,9±12,4	226,8±9,6	236,1±10,1 b	270,8±16,1 a***	243,5±9,2b	268,6±12,8 a**
Glucose (%MS)	22,3±0,43 b	23,0±0,64 a**	24,27±0,61	24,38±0,51	24,49±0,63	24,20±0,77
Fructose (%MS)	22,78±0,52 b	23,58±0,59 a**	24,13±0,28	24,38±0,73	24,52±0,53	24,12±1,01
Acide citrique (%MS)	4,48±0,33 b	5,06±0,64 a*	4,54±0,39	4,99±0,53	4,99±0,82 b	5,86±0,5 a*
Acide malique (%MS)	0,38±0,04 b	0,44±0,05 a*	0,46±0,08	0,48±0,06	0,51±0,1b	0,60±0,03a*

4.2.4 Potentiel photosynthétique

Bien que les différences ne soient pas significatives, le Tableau 11 montre que le pourcentage de MS contenu dans un fruit a tendance à être systématiquement supérieur en TransPAR. Or, la matière sèche créée par la culture et notamment la matière sèche des fruits peuvent permettre d'avoir une idée de la photosynthèse réalisée sur la période considérée. A partir du rendement total qui donne la quantité de matière fraîche créée et du taux de matière sèche moyen dans chaque fruit, il est possible de calculer le rendement en matière sèche. Le rendement total en matière sèche est alors de 1,859kg/m² pour Eclipse et 1,905kg/m² pour TransPAR. Le rendement en matière sèche est supérieur de 2% en TransPAR alors qu'en matière fraîche, il est supérieur en Eclipse mais dans les deux cas la différence n'est pas significative. En effet, sur l'ensemble de la période de récolte, le test statistique comparant les rendements hebdomadaires en matière sèche ne fait pas apparaître de différence significative (Tableau 12).

Tableau 12 : Rendement final grappe et vrac exprimé en masse sèche. L'ensemble des récoltes de la semaine 16 à 34 ont été utilisées. ns = non significatif.

Modalité	Rendement (kg de MS/m ² /semaine)	Significativité
Eclipse	0,098 ± 0,028	ns
TransPAR	0,100 ± 0,031	ns

Néanmoins, il faut être conscient que la meilleure approche pour évaluer l'intensité de la photosynthèse est de mesurer de jour l'O₂ s'échappant des feuilles puisque celui-ci est produit par la photosynthèse. En effet, l'approche présentée ne permet pas de connaître la photosynthèse ayant réellement eu lieu mais simplement l'allocation de matière organique vers les fruits en fonction de la modalité. En effet, la photosynthèse permet d'estimer le rendement car elle est directement responsable de la production de biomasse mais l'environnement de la plante a un impact prépondérant sur l'allocation des ressources aux différentes parties de la plante. Autrement dit, en fonction des conditions environnementales auxquelles la plante est exposée, les fruits et les feuilles recevront proportionnellement plus ou moins de ressources.

Ainsi, la photosynthèse peut aussi être étudiée à l'échelle de la biomasse totale de la plante mais c'est une méthode destructive qui aurait nécessité de prélever des plantes entières pour connaître leur pourcentage de matière sèche. Etant dans une serre commerciale, cette solution n'était pas possible à réaliser.

Grâce au modèle de photosynthèse réalisé par Körner (2008), à une concentration de CO₂ de 400ppm et en utilisant le rayonnement d'une belle journée de Juillet pour laquelle environ 27% de RPA est transmis en plus en TransPAR, le potentiel photosynthétique est supérieur de 8,5% en TransPAR. Il faut tout de même noter que cette valeur théorique est obtenue en cas de déficit hydrique non limitant. Etant donné que la photosynthèse et le rendement n'ont pas été supérieurs en TransPAR, il est probable qu'un facteur climatique soit limitant. Il serait nécessaire de lever la limitation induite pour ce facteur pour bénéficier de l'effet positif du RPA supplémentaire en TransPAR.

Synthèse de la partie 4.2 : les différences de transmission du R_g et du climat entre les modalités ont eu un effet sur le développement de la plante (évolution du poids moyen et cinétique de croissance de la plante), sur la conductance stomatique en deuxième période et la teneur en vitamine C des fruits. La protection de la récolte vis-à-vis du R_g ainsi que le rendement ont été identiques. La photosynthèse réalisée dans les deux modalités est identique mais d'après le modèle de Körner, il serait possible de l'augmenter de plus de 8%.

5 Conclusion

L'essai mené s'intégrait dans une problématique générale de contrôle du climat printanier et estival à l'aide de techniques d'ombrage tout en limitant la baisse de transmission du rayonnement photo-synthétiquement actif (RPA). Un des intérêts de cet essai est de s'être déroulé dans une serre commerciale de tomates permettant de tester et comparer deux produits d'ombrage dans des conditions de terrain. Il a permis d'obtenir une grande quantité de données quantifiées concernant la transmission du rayonnement, le climat et l'impact de ces peintures sur la physiologie de la culture, le rendement et la qualité. La comparaison entre Eclipse, une peinture d'ombrage classique et la peinture photo-sélective (PPS) aux infra-rouge, TransPAR, a été utile pour améliorer la compréhension de l'impact de cette dernière sur la culture de tomate.

Les principaux résultats ont été une transmission du rayonnement global (Rg) et du RPA plus élevée en modalité TransPAR après la 1^{ère} et la 2^{nde} application. Le supplément de RPA avec TransPAR lors d'une journée ensoleillée dépasse 20%. L'impact sur la température et le déficit hydrique (DH) ont été différents selon la période d'application, ne confirmant pas les hypothèses sur les résultats attendus. En première période, la température a été légèrement plus fraîche en TransPAR puis identique en deuxième période, confirmant l'efficacité au moins équivalente du TransPAR par rapport à l'Eclipse sur le contrôle de la température. En première période, le DH a été identique dans les deux modalités puis supérieur en seconde période en TransPAR. Le rayonnement global supplémentaire, la température plus fraîche en première période et le DH plus élevé en deuxième période en TransPAR n'ont pas eu d'impact négatif sur la production finale. Les deux peintures ont donc permis une protection équivalente de la culture.

En première période, la vitesse d'augmentation du poids moyen des fruits a été supérieure avec TransPAR. De plus, les différences de climat liées à un écart de rayonnement ont probablement eu un impact sur la physiologie des plantes qui ont été plus génératives en TransPAR qu'en Eclipse, confirmant ainsi une observation faite lors d'un essai en 2012 au CTIFL de Carquefou.

Par ailleurs, en accord avec l'hypothèse initiale, la modalité TransPAR a eu un effet positif significatif vis-à-vis de la teneur en sucres et en acides et très significatif pour la vitamine C. Avec l'intérêt croissant des consommateurs vis-à-vis d'une bonne nutrition, l'utilisation du TransPAR offre des perspectives intéressantes vis-à-vis de la qualité chimique de la tomate. Bien que les hypothèses initiales envisageaient une photosynthèse plus élevée en TransPAR induisant ainsi un rendement supérieur, celle-ci ne s'est pas vérifiée dans les conditions de l'essai. Théoriquement, le supplément de RPA peut permettre d'obtenir 8,5% de photosynthèse en plus avec TransPAR mais un facteur climatique autre que le rayonnement est probablement limitant.

L'objectif méthodologique initial visant à obtenir la même transmission de Rg dans les deux modalités pour pouvoir faire ressortir clairement le rôle du RPA supplémentaire en TransPAR n'a pas été atteint puisque la transmission du Rg a été différente après chaque application. De plus, un capteur RPA extérieur a manqué et aurait permis d'analyser plus finement le RPA transmis dans chaque modalité. Par ailleurs, l'irrigation n'a pas pu être gérée indépendamment dans chaque modalité durant l'ensemble de l'essai alors qu'une différence de rayonnement transmis implique d'adapter l'irrigation en conséquence. Le DH ayant été supérieur en TransPAR en deuxième période, il est possible qu'il ait participé, dans une certaine mesure, à limiter la photosynthèse. D'autre part, le climat atypique avec peu de journées ensoleillées lors de la première période n'est pas représentatif des normales saisonnières de la Provence. On peut supposer que les variables climatiques et donc les variables physiologiques auraient évolué différemment en cas d'une année avec un climat habituel.

La majorité des producteurs fractionnent actuellement l'apport de peinture afin de limiter la perte de rayonnement au Printemps. Cette pratique rend possible l'association de deux produits différents.

En effet, en première période (Printemps), les résultats tendent à montrer que l'utilisation du TransPAR serait plus adéquate qu'un blanc d'ombrage puisqu'elle a permis un contrôle du climat égal voir plus efficace tout en offrant un potentiel photosynthétique plus élevé. De plus, il ressort des mesures climatiques que la dose efficace de TransPAR pourrait être abaissée. Ainsi, un itinéraire envisageable consisterait en une application entre 200 et 250 kg/ha de TransPAR en première période lorsque le rayonnement, les températures et le déficit hydriques ne sont pas encore excessifs. Le rendement théorique serait alors supérieur à condition de lever les facteurs limitant. En l'occurrence, un ajustement de l'irrigation et/ou de l'hygrométrie en complément de l'utilisation du TransPAR pourrait permettre de valoriser le RPA supplémentaire. Il serait aussi intéressant de tester un effeuillage moins important pour rééquilibrer les plants et potentiellement permettre une photosynthèse accrue. En effet, la surface foliaire serait alors plus grande permettant ainsi de valoriser le supplément de RPA permis par le TransPAR. Une augmentation de densité aurait un intérêt comparable à un effeuillage réduit. Pour valoriser le Rg et le RPA plus élevés, il faudrait également adapter la gestion climatique pour obtenir des températures moyennes 24h plus élevées en chauffant ou en confinant plus la serre.

Au contraire, en seconde période (été), le TransPAR n'apporte à priori pas d'avantage lorsqu'il est utilisé sur des serres anciennes. Une application de peinture classique à une dose de 100kg/ha serait adaptée. L'avantage serait de limiter le DH en seconde période tout en réduisant le coût global de la protection.

BIBLIOGRAPHIE

Acock, A, et al., (1978). The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis : An experimental examination of two canopy models. *J. Exper. Bot.* 29, 815-829.

Atherton J.G. et al., (1986). *The Tomato Crop*, first edition., Chapman and Hall Ltd, Cambridge, 661 p.

Baille, A., et al., (2001). Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology* 107, 293–306.

Blanchard, et al., (2010). Influence of NIR-Reflecting shading paint on greenhouse environment, plant temperature, and growth and flowering of bedding plants. *Transactions of the ASABE* 53, 939–944.

Brajeul E. et al., (2011), Note de synthèse sur les produits de blanchiment classiques et photo-sélectifs, CTIFL, p1.

Brajeul E. et al., (2010), Essai de conduites climatiques en culture hors sol sous serre, Compte-rendu Concombre, CTIFL.

Brajeul, E. (2001). *Le Concombre*, Issoudun, CTIFL.

Bunce et al., (2000). Responses of stomatal conductance to light, humidity and temperature in winter wheat and barley grown at three concentrations of carbon dioxide in the field. *Global Change Biol.* 6, 371-382.

Cockshull, K.E., et al., (1992) The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, 67, 11-24.

Davies JN. Et al., (1981) The constituents of tomato fruit – the influence of environment, nutrition and genotype. *Crit Rev Food Sci Nutr* 15:205–280

Dumas Y. et al., (2003) Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes, *Journal of the Science of Food and Agriculture* 83, 369-382.

Fatnassi, H., et al., (2003). Simulation of climatic conditions in full-scale greenhouse fitted with insect-proof screens. *Agricultural and Forest Meteorology* 118, 97–111.

Fressignac, J. (2012). *Agreste conjoncture Légumes* (Montreuil: Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt).

García-Alonso, et al., (2010). Numerical Simulations of Temperatures in Greenhouse covered with NIR-Reflecting Photosensitive Film.

Gautier, H., et al., (2009). Regulation of tomato fruit ascorbate content is more highly dependent on fruit irradiance than leaf irradiance. *Annals of Botany* 103, 495–504.

Génard, M., et al., (2007). Towards a virtual fruit focusing on quality: modelling features and potential uses. *Journal of Experimental Botany* 58, 917–928.

Gomez, L. et al., (2007). The microplate reader : an efficient tool for the separate enzymatic analysis of Sugars in plant tissues – validation of a micro-method. *J Sci Food Agric* 87:1893-1905.

- Gulrez, S. et al., (2013). Evaluation of PE Films Having NIR-Reflective Additives for Greenhouse Applications in Arid Regions. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013.
- Hemming, S. (2007). Gain better light by using the right covering. *Flower Tech* 24–26.
- Hemming, S., et al., (2006). Greenhouse cooling by NIR-reflection. *Acta Horticulturae*.
- Imanishi, S. et al., (1975). Relationship between fruit weight and seed content in tomato fruit. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 44, 33–40.
- Impron, I. et al., (2008). Effects of cover properties, ventilation rate, and crop leaf area on tropical greenhouse climate. *Biosystems Engineering* 99, 553–564.
- Katsoulas, N., et al., (2001) Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. *Agric. For. Meteorol.* 106, 233-247.
- Kempkes, et al., (2008). Cover materials excluding near infrared radiation: effect on greenhouse climate and plant processes. eds. (ISHS), pp. 477–482.
- Kittas, et al., (1999). Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouses. *J. Agric. Engng Res.* 73, 341-351.
- Kittas, et al., (2003), Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. *Biosystem Engineering*. 85, 87-94.
- Kläring, et al., (2012). Screening a cucumber crop during leaf area development reduces yield. *Annals of Applied Biology* 161, 161–168.
- Kleinhenz, V et al., (2006) Biomass accumulation and partitioning of tomato under protected cultivation in the humid tropics. *Europ.J. Hort.Sci.* 71, 173-182.
- Körner, O. et al., (2008). Quantification of temperature, CO₂, and light effects on crop photosynthesis as a basis for model-based greenhouse climate control. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 84, 233–239.
- Kumar, K.S., et al., (2009). Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review. *Energy and Buildings* 41, 1269–1275.
- Lamnatou, C., et al., (2013). Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fresnel lenses, NIR- and UV-blocking materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18, 271–287.
- Mashonjowa, et al., (2009). The effects of whitening and dust accumulation on the microclimate and canopy behaviour of rose plants (*Rosa hybrida*) in a greenhouse in Zimbabwe. *Solar Energy* 84, 10–23.
- Mashonjowa, et al., (2010). Measurement and simulation of the ventilation rates in a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe. *Appl. Eng. Agric.* 26, 475-488.
- Mutwiwa, et al., (2006). Response of tomato plants to natural ventilation and evaporative cooling methods. In *International Symposium on Greenhouse Cooling* 719, pp. 447–454.
- Mutwiwa, U.N., et al., (2011). Effects of near infra-red reflection greenhouse cooling on blossom-end rot and fruit cracking in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *African Journal of Horticultural Science* 1,

Navez, B. (2011). *Tomate, qualité et préférences* (CTIFL). 335pp.

Sethi, V.P. and al., (2008), Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Sol. Energy* 82, 832-859.

Sérino, et al., (2009). HPLC Assay of Tomato Carotenoids : Validation of a Rapid Microextraction Technique. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Vol. 57, No.19, 99. 8753-8760.

Saure, et al., (2001). Blossom-end rot of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) –a Calcium disorder or a stress related disorder. *Sci. Hort.* 90, 193-203.

Spaargaren, J.J. (2001) *Supplemental Lighting for Greenhouse Crops*. 4 Published by P.L. Light Systems Inc. Beamsville ON Canada. 178 pp.

Stanghellini, et al., (2011). Effect of near-infrared-radiation reflective screen materials on ventilation requirement, crop transpiration and water use efficiency of a greenhouse rose crop. *Biosystems Engineering* 110, 261–271.

Stanghellini, C., et al., (2008). Cover materials excluding near infrared radiation: what is the best strategy in mild climates? In *International Symposium on Strategies Towards Sustainability of Protected Cultivation in Mild Winter Climate* 807, pp. 67–72.

Stanhill, G., et al. (1973). The radiation balance of a glasshouse rose crop. *Agricultural Meteorology*, 11, 385-404.

Stevens, R. et al., (2006), *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Vol. 54 No., 19, pp. 61593-6165,.

Thomas, J. (1986). Comparaison des microclimats sous deux systèmes d'ombrages sous serre. *Les Cahiers Du CNIH* 19–25.

Thimijan et al., (1983) Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. *HortScience* 18: 818-822.

Thomas J. (1986), Comparaison des microclimats sous deux systèmes d'ombrages sous serre. *Les Cahiers du CNIH*, 6, pp19-25.

Tisiot R., (2010), Comparaison de produits d'ombrage sélectifs, CTIFL, Ballandran, p10.

Tisot R. (2011), Evaluation des peintures d'ombrage à effet photo-sélectif, CTIFL, Ballandran.

Urban L. et al., (2010). *La production sous serre*. 2 éd., Lavoisier, Paris, 233 p

Van der Spek, *Nutrition et bien être mental, pourquoi et comment l'alimentation influence notre cerveau*. P 179.

Von Elsner et al., (2003). Effects of interference pigments in shading paint for greenhouses. *Proceedings of the Thirty-first Agricultural Plastics Congress*, August 16-19, Michigan, USA, p .6-16.

Von Elsner, B. (2005). Interference pigments in photoselective shading paint for greenhouses. In *V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture* 711, pp. 417–422.

Wacquant C., et al., (1995). Maîtrise de la conduite climatique. Tomate sous serre et abris en sol et hors sol. Les éditions du CTIFL, Paris, 127p.

Ward GM. et al., (1973). Causes of blossom-end rot of tomatoes based on tissue analysis. Canadian Journal of Plant Science 53: 169±174

Winsor GW, et al., (1976). Changes in the composition and quality of tomato fruit throughout the season. Annual Report of the Glasshouse Crops Research Institute 1975: 134±142

Willits, et al., (2000). Constraints and limitations in greenhouse cooling. Challenges for the next decade. Acta Hort. 534, 57-66.

Zhao Y. et al., (2010), Effect of temperature and light to tomato PS and quality in greenhouse, College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China.

Webographie

Boulard, T. (2012). Maîtrise du climat des serres.
<http://fr.slideshare.net/greensmile/prsentation-thierry-boulard-partie-1> (consulté le 18/04/2013)

FAO (1997), Biological energy production.
<http://www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e05.htm#1.2.1> (consulté le 25/06/2013)

FAOSTAT (2012), Statistique mondiale sur la tomate.
<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor> (consulté le 05/03/2013)

Turcotte, G. (2005). Tom'Pousse n°32. Agréseau
http://www.agrireseau.qc.ca/legumesdeserre/documents/TP32_05_sem44.pdf (consulté le 30/05/2013)

USDA (2010), US and world tomato statistics.
<http://usda.mannlib.cornell.edu/MannUsda/viewDocumentInfo.do?documentID=1210>
(consulté le 04/03/2013)

UVED (2008), Le rayonnement et la matière.
<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-3-reflexion.html> (consulté le 24/07/2013).



AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers

2 rue André Le Nôtre

SUDLAC

1 rue Gaston Monmousseau,

38130 Echirolles

INRA Avignon

Unité plantes et systèmes de cultures horticoles (PSH)

Domaine St Paul – Site AgroParc –
84914 Avignon cedex 9

ANNEXES

Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage

Année universitaire : 2012 - 2013

Spécialité : Horticulture

Spécialisation ou option : Gestion Durable du Végétal en Horticulture et Paysage

Effets du TransPAR, produit d'ombrage photo-sélectif aux infrarouges courts, sur le microclimat et le développement d'une culture de tomate sous serre verre.

Par : **Corentin THIBAUD**

Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation définitive)

ou son représentant

Date : .../.../... Signature

Oui Non

Bon pour dépôt (version

Autorisation de diffusion :

Devant le jury :

13/09/2013

Soutenu à Angers, le :

Sous la présidence de : Josianne LE-CORFF (Maître de Conférences à Agrocampus Ouest Angers)

Maître de stage : Olivier BERTHELIER (Ingénieur d'affaire, Sudlac)

Enseignant référent : Christophe MIGEON (Maître de Conférence Agrocampus Ouest Angers)

Autres membres du jury : Etienne CHANTOISEAU (Maître de Conférences à Agrocampus Ouest Angers), Eric BRAJEUL (Directeur du centre CTIFL de Carquefou).

"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST ».

Annexe I : Protocole de mesure des variables de cinétique de développement **(Source : C.THIBAUD)**

- Stade de floraison :

Il est noté à partir du bouquet le plus jeune avec au moins une fleur ouverte.

Le nombre de fleurs ouvertes sur le bouquet est aussi noté.

On note le numéro du bouquet en fleurs en partie entière et le nombre de fleurs épanouies sur le bouquet en partie décimale en prenant la convention suivante : 1 fleur=0 ; 2fleurs=2 ; 3 fleurs=4 ; 4fleurs=6 ; 5fleurs et plus=8. On notera donc le 2^{ème} bouquet en fleurs avec 3 fleurs épanouies par 2,4 ; le 5^{ème} bouquet avec 5 fleurs épanouies 5,8.

- Stade de récolte

Le protocole est le même. La notation se fait à partir du dernier bouquet récolté.

Sur les variétés grappes la partie décimale est toujours 8 puisque la grappe est récoltée entièrement.

Par exemple, si c'est le 8^{ème} bouquet qui a été récolté en dernier. On notera 8,8. Si c'est le 12^{ème}, 12,8. Et ainsi de suite, 13,8 ; 14,8 ; etc...

- Charge en fruits

C'est le nombre total de fruits présents sur la plante (tige) au moment de la notation. On décompte un fruit dès le stade petit pois. A noter que les bouquets sont régulés à 5 fruits.

- Allongement (croissance)

Cette variable permet de mesurer l'allongement durant la semaine précédente. Lors de la semaine passée, on a repéré la position de l'apex terminal à l'aide d'une marque sur le fil de palissage. On peut ainsi mesurer la distance entre deux marques consécutives.

- Diamètre de tige

On le mesure au niveau de la marque précédente.

La tige de tomate n'étant pas ronde et étant plus large dans un axe que dans l'autre, on choisira l'axe le du diamètre le plus petit pour cette mesure.

- Distance fleur-apex

C'est la distance entre l'apex terminal (le plus jeune des bouquets en développement) et le bouquet fleuri ayant servi à la notation du stade floraison.

- Longueur de feuille

La feuille la plus proche de la marque de la semaine passée est utilisée. Elle se situe donc à une distance entre 15 et 30cm de l'apex en fonction de l'allongement de la tige durant la semaine. La mesure est réalisée en mesurant la distance entre la partie du pétiole jointe à la tige au bout du dernier foliole le plus à l'extrémité.

- Largeur de feuille

La même feuille que celle utilisée pour la longueur est utilisée. C'est la distance entre les bouts des deux folioles les plus longs de la feuille. Ceci correspond en général aux deuxièmes folioles en partant de la tige. Il est nécessaire de bien étaler les deux folioles pour faire la mesure. En effet, naturellement, l'angle entre les deux folioles n'est pas de 180°C et varie selon les feuilles et les plantes.

Annexe III : Matériel végétal et itinéraire cultural (Source : C.THIBAUD)

Matériel végétal	
Variété	Climberley (variété grappe)
Substrat	Pain de laine de roche Grodan
Densité	2.1 tiges/m ² jusqu'au 15 Janvier puis 2.8 tiges/m ² . (densité au sol en écartant la surface de l'allée centrale du calcul).
Introduction dans la serre	12 Octobre 2012
Age des plants à l'introduction	35 jours
Etêtage	15 Juillet 2013
Fin de culture	mi-Septembre 2013

Entretien de la culture	
Conduite	Conduite en double tête
Effeuilage	Tous les 15 jours
Palissage	Tous les 10 jours
Descente	Chaque semaine
Régulation	Régulation à 5 fruits
Récolte	2 fois par semaine (Lundi et Jeudi)
Protection biologique	Koppert France
Pollinisation	Pollinisation naturelle avec bourdons (<i>Bombus terrestris</i>). Environ 16 ruches avec 2 ruches renouvelées tous les mois.
Traitements	Fongicide contre oïdium, botrytis, etc...

Consignes de gestion automatisée	
Ordinateur climatique	Logiciel de gestion climatique Hoogendoorn
CO2	Pas d'injection.
Chauffage (au printemps)	12°C de nuit et 18°C de jour.
Irrigation fertilisante	CE : 4.5mS/m. Drainage à 30%

Annexe IV : Température idéales et seuils de température pour la culture de tomates.
(Source : C.THIBAUD)

Type de température	Période de temps	Valeurs de température
Température d'ambiance (°C)	Optimum 24h	18-21 25 (Urban, 2010)
	Jour	20 ou plus (Atherton, 1986)
	Maximum instantané	30 (Zhao, 2010)
	Minimum instantané	13 (Navez, 2011)
	Ecart jour-nuit optimal	9 Dépend de l'ensoleillement durant la journée. (Urban, 2010)
Température racinaire (°C)	Optimum 24h	18 (Atherton, 1986)
	Jour	15-19°C (Atherton, 1986)
	Nuit	15-19°C (Atherton, 1986)
	Maximum instantané	24 (Zhao, 2010)

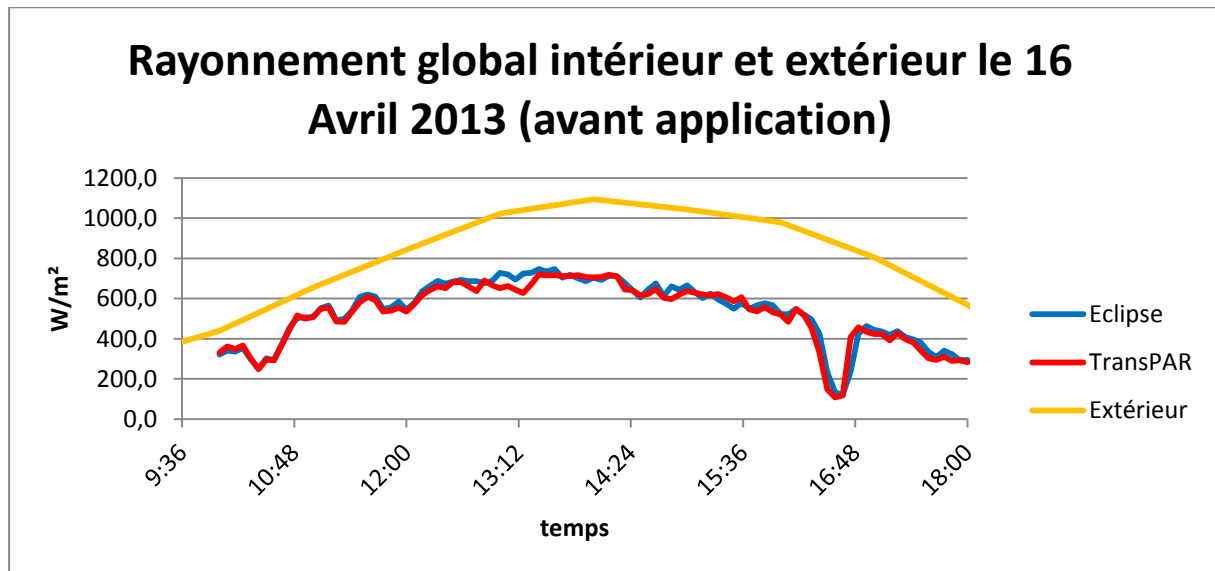
Annexe V : Valeurs optimale de déficit hydrique en culture de tomate. (Source : C.THIBAUD)

Période de culture	Valeurs de DH
Toutes saisons confondues	2 à 10 g/kg d'air sec (Navez, 2011)
Automne-Hiver	DH > 3 g/kg le jour (Navez, 2011) DH > 2 g/kg la nuit (Navez, 2011)
Eté	Optimum vers 5-6 g/kg d'air sec (Wacquant, 1995)

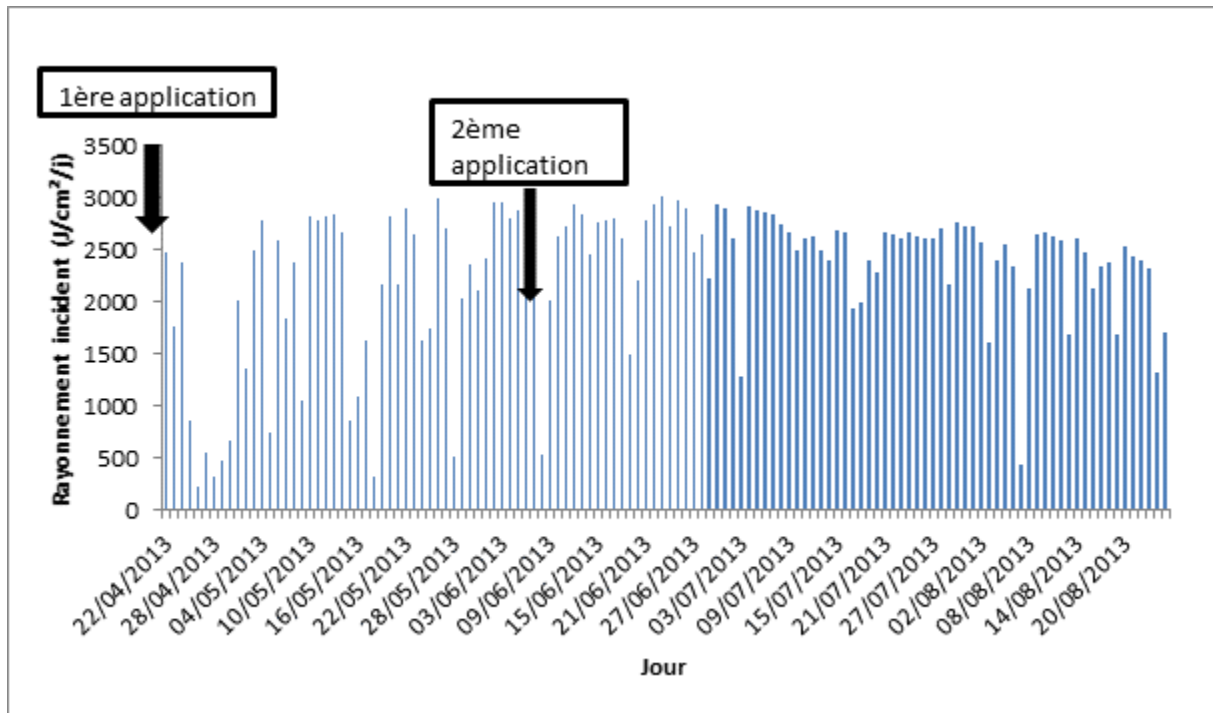
Annexe VI : effets de la température sur la physiologie de la tomate (Source : C.THIBAUD)

Température appliquée à la culture	Effets
T adéquate	(+) croissance (Zhao, 2010) (+) allongement tiges (Zhao, 2010) (+) accumulation matière sèche (Zhao, 2010)
T > 30 °C	(-) PS nette (Zhao, 2010)
T trop faible < 18°C	(-) PS nette (Urban, 2010)
Ecart jour-nuit important	(+) Floraison (Urban, 2010)
T° jour > T° nuit	(+) accumulation de matière sèche (Urban, 2010) (+) allongement des tiges (Urban, 2010)
T racinaire > 24°C	(-) croissance en poids sec réduite (Zhao, 2010) (+) allongement (Zhao, 2010)
T racinaire > 28°C	(-) détérioration des plus jeunes racines (Zhao, 2010) (-) carences en calcium (Zhao, 2010) (-) risque d'asphyxie car la concentration en oxygène dissous diminue (Zhao, 2010) (-) risque de développement de champignons (pythium) (Navez, 2011)

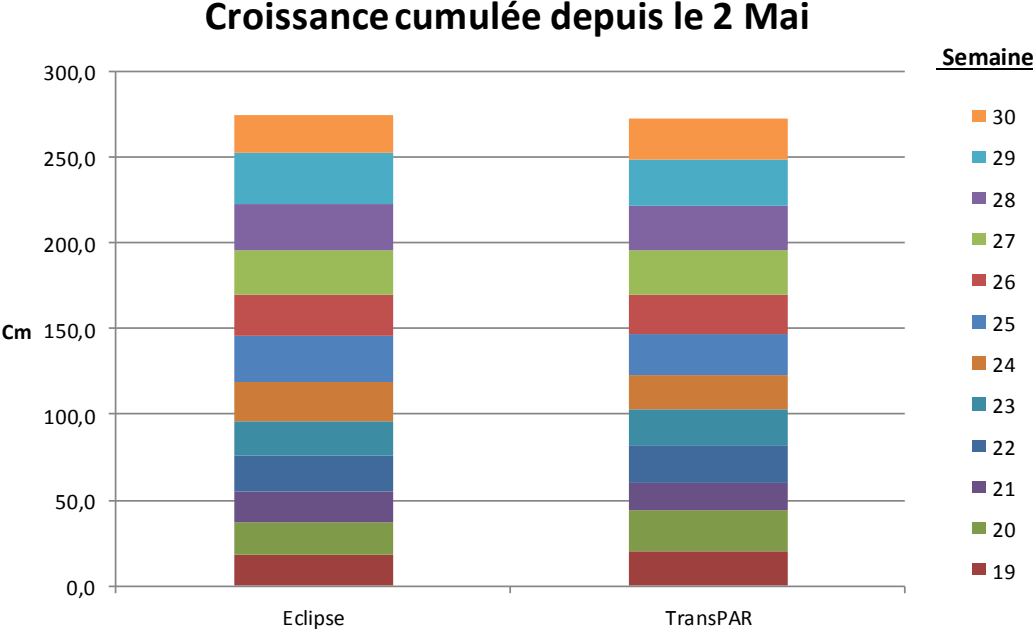
Annexe VII : Rg incident extérieur et Rg transmis dans la serre le 16 Avril 2013 (avant application) (Source : C.THIBAUD)



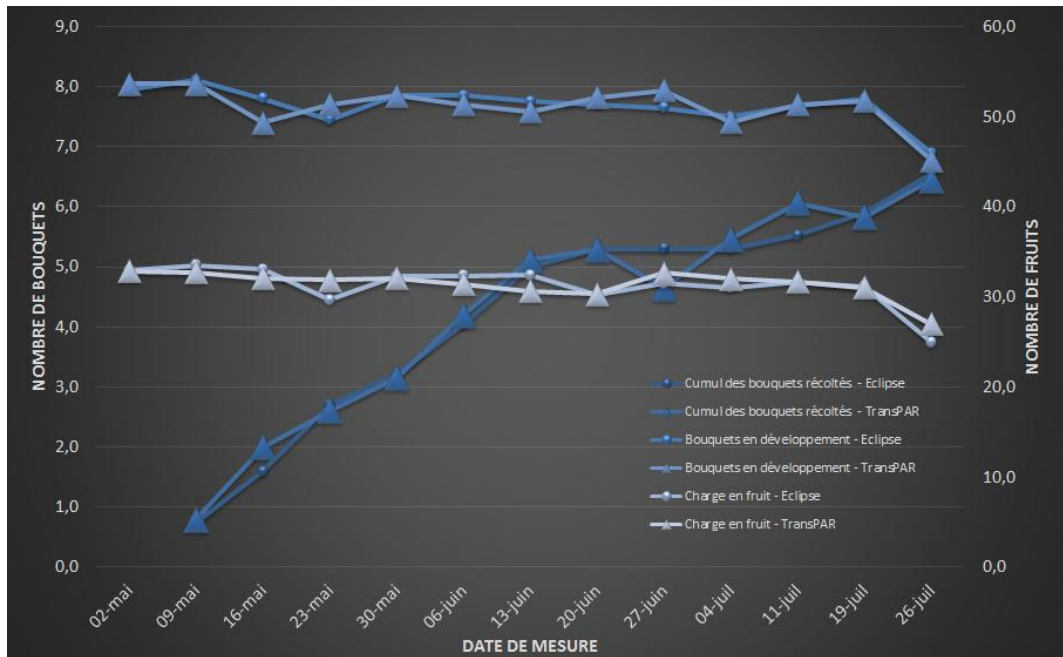
Annexe VIII : Rayonnement global extérieur sur la période de l'essai (Source : C.THIBAUD)



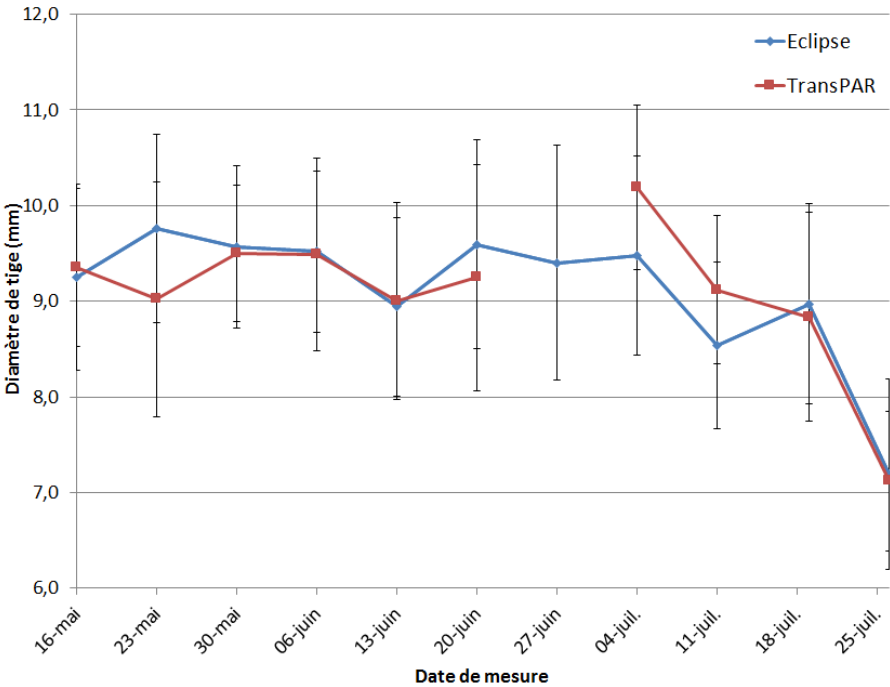
Annexe IX : Croissance hebdomadaire selon la modalité. (Source : C.THIBAUD)



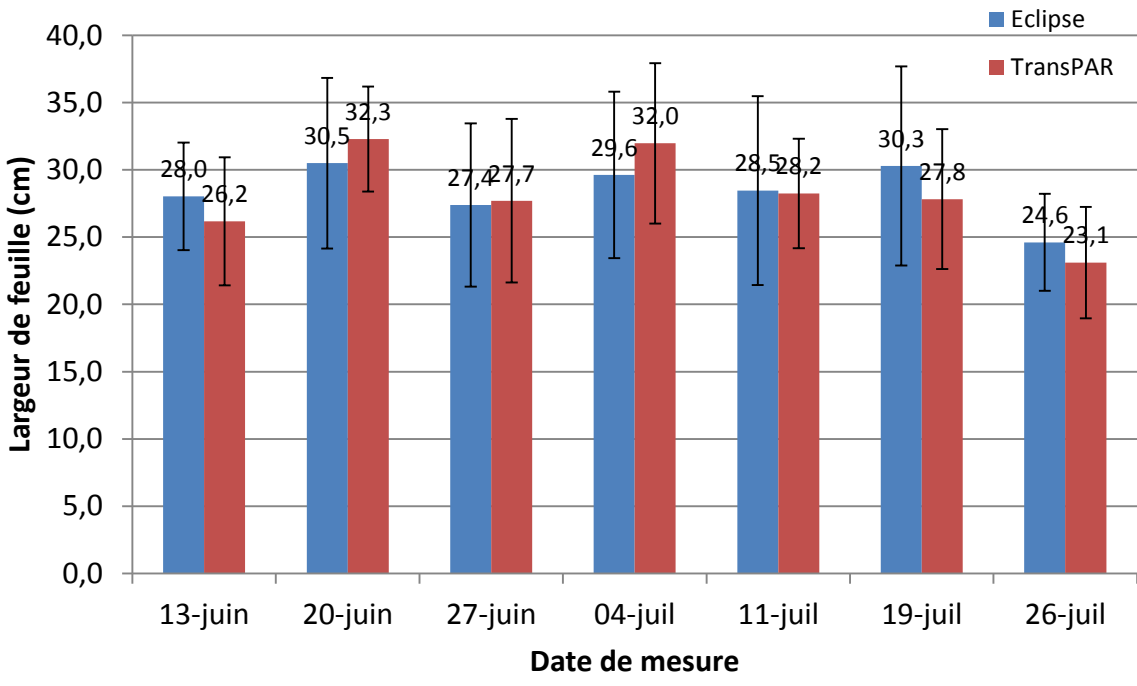
Annexe X : Evolution hebdomadaire du nombre de bouquets récoltés cumulés, du nombre de bouquets en développement et de la charge en fruit selon la modalité.
(Source : C.THIBAUD)



Annexe XI : Evolution hebdomadaire du diamètre de tige (Source : C.THIBAUD)



Annexe XII : Evolution hebdomadaire de la largeur de feuille. (Source : C.THIBAUD)





Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage.

Spécialité : Horticulture

Spécialisation / option : Gestion Durable du Végétal en Horticulture et en Paysage (GDVHP)

Enseignant référent : Christophe MIGEON

Auteur(s) : Corentin THIBAUD

Date de naissance* : 18/01/1989

Nb pages : 40 Annexe(s) : 12

Année de soutenance : 2013

Organisme d'accueil : SUDLAC

Adresse : 1 rue Gaston Monmousseau,
38130

Echirolles

Maître de stage : Olivier BERTHELIER

Titre français : Effets du TransPAR, produit d'ombrage photo-sélectif aux infra-rouges courts sur le microclimat et le développement d'une culture de tomates sous serre verre.

Titre anglais : Effects of TransPAR, a near-infrared reflective shading product, on glasshouse microclimate and development of tomato crop.

Résumé (1600 caractères maximum) :

Les effets sur le microclimat d'une serre en verre et la culture de tomate d'une peinture réfléchissante aux infra-rouges courts, le TransPAR, ont été étudiés par comparaison avec une peinture de blanchiment témoin. Cette étude a été réalisée à travers la mise en place d'un essai dans une serre commerciale de tomates dans le Sud de la France.

Les résultats de l'essai montrent que le TransPAR permet une meilleure transmission du rayonnement utile à la photosynthèse (RPA) tout en permettant une protection similaire de la culture même si le déficit hydrique a été légèrement supérieur en modalité TransPAR après la deuxième application de peinture. Le potentiel photosynthétique de la culture est donc plus élevé en TransPAR, mais l'égalité des rendements indique qu'une adaptation de la conduite climatique et culturale est nécessaire pour profiter du bénéfice de RPA supplémentaire.

En termes de qualité biochimiques du fruit, l'utilisation du TransPAR montre un intérêt puisqu'il augmente sa teneur en vitamine C ainsi que celles de plusieurs composés d'intérêts pour le goût et la santé.

Abstract (1600 caractères maximum) :

Effects of TransPAR, a NIR reflective paint, on glasshouse microclimate and development of tomato crop have been investigated by comparing TransPAR to a classical shading paint. For this to make, a trial took place in a commercial glasshouse producing tomato in South of France.

It appears that photosynthetically active radiation (PAR) are more transmitted in the glasshouse when using TransPAR than the classical shading paint. Furthermore TransPAR allowed the same protection for plants and yield than the classical shading paint although humidity were lower in TransPAR after second paint application. Thus, photosynthetic potential of the tomato crop is higher with TransPAR, but the identical yields that were obtained lead to think that it is necessary to adapt climatic and crop management in order to benefit of the PAR supplement.

Concerning quality results, fruits growing under TransPAR had a higher ascorbic acid concentration and the same results were obtained for other chemicals that are as well important for taste and health aspects.

Mots-clés : Rayonnement solaire, ombrage, peinture, infra-rouges courts, transmission, serre verre, tomate.