



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Nancy-Université
Université
Henri Poincaré

Université Henri Poincaré

Faculté des Sciences et Techniques Nancy 1



PSH-Plantes et systèmes de cultures horticoles-INRA

Ctifl-Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes

Master II Forêt, Agronomie et Génie de l'Environnement

Spécialité Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes

*Effet d'une conduite économe en énergie sur l'architecture des plantes
et la qualité des fruits de tomates (Lycopersicon esculentum)*

*Présenté par : Mlle **Fatiha FIFEL***



Tuteur de stage: **Christophe ROBIN**

Encadrant de stage : **Hélène GAUTIER**

Année universitaire : **2009/2010**

Gilles VERCAMBRE

Jean Jacques LONGUNESSE

Serge Lequillec

AVANT PROPOS

Ce document est mon rapport de projet de fin d'études de Master Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes de UHP Nancy et ENSAIA INPL. Il a été réalisé lors de mon stage au sein de l'Unité Plantes et Systèmes de culture Horticoles de l'INRA d'Avignon et du Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (Ctifl) de Nantes.

Mon sujet de stage intitulé « Effet d'une conduite économe en énergie sur l'architecture des plantes et la qualité des fruits de tomates (*Lycopersicon esculentum*) », a été encadré par Mme Gautier, Mr Vercambre, Mr Longuenesse pour l'INRA et Mr LeQuillec pour le Ctifl.

DEDICACE

*Je dédie ce travail en premier lieu à **mes chers parents** qui n'ont jamais hésité à m'offrir leurs soutiens et leurs bienveillance, que ce travail soit le symbole de ma reconnaissance de leur amour infini, que dieu vous protège et vous accorde une longue vie pleine de santé, de prospérité et de bonheur.*

*J'exprime aussi ma profonde gratitude à **mes frères et sœur** qui représentent toujours pour moi l'exemple à suivre et qui m'accordent sans cesse leurs soutiens et leurs aides.*

Sans oublier tous les membres de ma famille.

*A tous les enseignants de la formation M2 Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes **FGE** à UHP Nancy et ENSAIA INPL.*

*A tous mes amis de la promotion de M2 **FGE** et de MST **BioAAP** à la Faculté des Sciences et Techniques Marrakech.*

A tous ceux qui me sont chers

Remerciements

En premier lieu je remercie ALLAH pour tout

Je tiens tout d'abord à remercier Hélène Gautier et Jean Jacques Longuenesse pour m'avoir permis de réaliser ce stage.

J'aime adresser mes sincères remerciements à, Hélène Gautier qui par ses qualités personnelles a su créer une ambiance de recherche et rendre mon travail profitable à ma formation, merci aussi pour ses judicieux conseils, sa patience proverbiale. Je la remercie également pour sa contribution efficace à l'orientation de mon étude et qui malgré ses nombreuses occupations a toujours fait preuve d'une grande disponibilité et une grande patience pour répondre à mes questions, et diriger mon stage.

Je remercie chaleureusement Gilles Vercambre pour sa disponibilité, les connaissances et les conseils qu'il m'a apportés tout au long du stage, tant pendant l'expérimentation que pendant la rédaction.

Un grand merci à Jean Jacques Longuenesse qui m'a encadrée et suivi mon sujet de stage de loin ou de près.

Je tiens à remercier également Michel Letard directeur du Ctifl de Carquefou pour m'avoir accueillie dans le centre de Nantes. Merci également à Serge Lequillec qui m'a encadrée et suivi mon sujet de stage pour ses conseils et sa disponibilité. Je pense également à toute l'équipe du Ctifl sans qui cette expérimentation n'aurait pu être possible.

Je tiens à remercier également Christophe Robin, tuteur de stage, pour ses conseils, son grand soutien et sa disponibilité.

Je remercie également l'équipe « Plantes et Systèmes de Culture » pour son accueil.

Je remercie du fond du cœur les stagiaires de l'unité PSH et du Ctifl et les thésards, sans lesquels toutes ces conversations passionnantes n'auraient pu être possibles.

TABLE DE MATIERE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 2 |
| PRESENTATION DES ORGANISMES D'ACCUEIL..... | 3 |
| ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE..... | 5 |
| 1. LA TOMATE | 5 |
| 1.2. Morphologie et physiologie | 5 |
| 1.3. Production et qualité des fruits de tomates..... | 6 |
| 2. INTERETS ECONOMIQUES | 6 |
| 3. INTERETS NUTRITIONNELS..... | 7 |
| 4. SYSTEME DE CULTURE DE TOMATE..... | 7 |
| 4.1. Culture sous serre | 7 |
| 4.2. Durabilité de la production sous serre..... | 7 |
| 4.3. Stratégies pour la réduction des dépenses énergétiques..... | 8 |
| 5. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA CULTURE DE TOMATE | 9 |
| MATERIELS ET METHODES | 11 |
| 1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL..... | 11 |
| 1.1. Les serres..... | 11 |
| 1.2. Le système de chauffage | 11 |
| 1.3. Suivi de climat et énergie | 11 |
| 1.4. Gestion du climat et de la ferti-irrigation | 11 |
| 2. LE MATERIEL VEGETAL | 12 |
| 3. CONDUITE DE L'ESSAI : INTEGRATION DE TEMPERATURE ET PLAN EXPERIMENTAL | 12 |
| 4. DESCRIPTION DE L'ARCHITECTURE..... | 12 |
| 4.1. Mesures destructives par prélèvement des plantes..... | 12 |
| 4.2. Mesures non destructives | 13 |
| 5. COMPOSITION DES FRUITS | 15 |
| 6. ANALYSES STATISTIQUES | 15 |
| RESULTATS ET DISCUSSIONS | 16 |
| I. GESTION CLIMATIQUE ET BILAN ENERGETIQUE | 16 |
| I.1.Bilan climatique | 16 |
| I.2.Consommation énergétique | 16 |
| I.3.Bilan économique | 17 |
| II. CROISSANCE ET DEVELOPPEMENT DE LA PLANTE | 18 |
| II.1.Etude de l'index phyllochronique sur les plantes suivies au cours du temps..... | 18 |
| II.2. Croissance foliaire | 19 |
| II.3. Croissance de la plante | 21 |
| III. SUIVI DE LA QUALITE DES FRUITS | 21 |
| III.1.Teneur en matière sèche des fruits | 21 |
| III.2. Composition biochimique en sucres et en acides..... | 22 |
| CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES..... | 24 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 25 |

Introduction

La Tomate (*Solanum lycopersicum*) est cultivée dans de nombreux pays du monde (FAO, 2003), y compris dans des régions relativement froides grâce au développement des cultures sous abri. Son importance socio-économique, environnementale et nutritionnelle est loin d'être négligeable, c'est le troisième légume cultivé au monde, et le second légume le plus consommé (Najla, 2009). Elle contribue aux revenus agricoles de millions d'habitants. La production mondiale s'élève à 105 millions de tonnes (FAO, 2007) pour une valeur de 2,9 milliards d'euros. De plus, les fruits produits sont riches en vitamine C, provitamines A et E et pauvres en calories. La qualité de la production et le rendement des fruits dépendent des techniques culturales adoptées, en effet la tomate peut être cultivée en plein champ ou sous abri (sous tunnels froids ou serres chauffées). Ces derniers se sont développés fortement au 20^{ème} siècle, ils présentent l'avantage de s'affranchir dans une certaine mesure des rythmes saisonniers, permettant ainsi la culture en période défavorable, ou dans des zones peu adaptées. En effet, dans les pays industrialisés, la demande en fruits et légumes est plus ou moins constante quelle que soit la saison. Malheureusement, elle nécessite plus de moyens que l'agriculture classique de plein champ, il faut donc recréer des conditions favorables au développement des végétaux au sein d'un environnement généralement défavorable par un contrôle de plusieurs facteurs de l'environnement, tels que l'humidité, la teneur en dioxyde de carbone mais surtout la température. Les dépenses énergétiques représentent 20 à 40% des coûts de production maraîchères serres. Les pressions économiques sont également de plus en plus fortes. Il faut donc limiter les dépenses énergétiques dans les serres. Plusieurs solutions ont été proposées, notamment l'utilisation de cultivars moins exigeants en termes de température, le développement de système de contrôle de climat de la serre utilisant des énergies renouvelables, la réduction de la demande d'énergie des installations de serre ainsi que l'intégration de température.

Dans le cadre de ce projet ambitieux visant la production d'un rendement maximal pour un minimum de consommation d'énergie au sein des agrosystèmes, Plantinov'ser (2008[1]) est un programme de recherche et d'expérimentation construit dans le cadre du pôle de compétitivité Végépolys en incluant la recherche (Agrocampus Ouest - Centre d'Angers, et INRA), l'expérimentation en station (Ctifl), et sur sites pilotes (BHR, Arelpal)¹ et qui a pour objectif de proposer des stratégies de production sous serre originales et conformes aux contraintes relevant du concept de durabilité. Les études qui y sont envisagées portent d'une part sur l'élaboration de techniques innovantes visant à mieux gérer les apports énergétiques et d'autre part à améliorer la qualité des productions; les résultats de ces travaux seront mobilisés en conditions représentatives de la pratique qui permettront de proposer de nouvelles règles de conduites des agrosystèmes serres et seront articulés avec les professionnels serristes pour permettre de tester et d'adapter ces innovations dans une démarche de partenariat. C'est dans ce cadre que mon étude de stage s'inscrit et vise à étudier l'impact des systèmes de cultures limitant la consommation en énergie et de tester l'effet de la variété. Une expérimentation sous serres avec différentes conduites économes en énergie a été réalisée avec un suivi dynamique du développement des plantes, du rendement et de la qualité des fruits. D'autres parts les données acquises au cours de cette expérimentation seront utilisées pour paramétrer un modèle décrivant l'architecture de la plante de tomate.

¹ BHR : Bureau Horticole Régional ; ARELPAL : Association Régionale d'Expérimentation Légumière des Pays de la Loire

Présentation des organismes d'accueil

Les travaux conduits au cours de mon stage, se sont déroulés sur deux sites une partie expérimentation sous serres au Ctifl Carquefou (Nantes), pilote scientifique et technique du projet piloté par Serge Le Quillec, et une partie d'analyse des données et modélisation au sein de l'unité PSH (INRA) encadrée par Hélène Gautier, Gilles Vercambre et Jean-Jacques Longuenesse.

Institut National de Recherche Agronomique (INRA)

[2] Créé en 1946, l'Institut National de la Recherche Agronomique est un établissement public à caractère scientifique et technologique placé sous la tutelle des ministères de la Recherche et de l'Agriculture. Œuvrant au service de l'intérêt public, il est chargé de produire des connaissances scientifiques et, principalement dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement.

Le centre d'Avignon, (fondé en 1953) est essentiellement tourné vers l'agriculture méditerranéenne, concernant la qualité de la production maraîchère et fruitière et pour l'industrie régionale de la transformation agro-alimentaire selon deux pôles majeurs de recherches : Pôle Horticole Intégré et Adaptations aux Changements Climatiques. Il est également à noter qu'Avignon a été labellisé pôle de compétitivité (Pole Européen d'Innovation de Fruits et Légumes).

[2] L'unité PSH travaille sur les productions horticoles alimentaires, et principalement les fruits et légumes consommés en frais. Ses objectifs sont de prévoir l'effet de l'environnement en interaction avec le génome sur la qualité des produits.

L'unité s'appuie sur des compétences en écophysiologie, agronomie et écologie, et agrège les connaissances disciplinaires dans des modèles biophysiques prenant explicitement en compte les opérations culturales.

L'unité comprend 42 agents permanents (24 chercheurs, ingénieurs, 18 techniciens et administratifs) et de 6 à 10 doctorants et post-doctorants répartis en 3 équipes : Architecture et Gestion des ressources (AGR), Elaboration de la qualité des fruits (EQF), Ecologie de la production intégrée (EPI).

Centre techniques interprofessionnel des Fruits et Légumes (Ctifl)

Le Ctifl a été créé en 1952 dans le cadre de la loi de 1948 sur les Centres Techniques Industriels. C'est un organisme d'utilité publique à but non lucratif. Son objectif est d'aider les entreprises de la filière fruits et légumes à améliorer leurs performances. Le Ctifl est composé de 4 centres d'expérimentation (Carquefou, Lanxade, Balandran, Saint Rémy) et il coordonne également un travail en réseau avec 36 stations régionales d'expérimentation (Fig. 1). Cet organisme offre des services spécifiques de diagnostic ou d'assistance technique dans les domaines suivants : matériel végétal, pratiques culturales, entrepôt-station, commercialisation-distribution, démarche qualité et référentiels, information économique et documentation. Le budget annuel s'élève à 23 millions d'Euros : 64% du budget est issu de la **Taxe Fiscale Affectée**, 12% du CASDAR (Caisse d'Affectation Spéciale Développement Agricole Rural), 6% de **subventions diverses** (Ministères de l'Agriculture et de la Recherche, Union Européenne, VINIFLHOR...), 18% de **produits propres** (stages de formation, publications, ventes de plants, de greffons et de porte-greffes, prestation de services).



Figure 1 : Localisation géographique des centres d’expérimentation du Ctiifl [3]

Le centre de Carquefou est situé dans la région des Pays de la Loire, dans le département de la Loire Atlantique et plus précisément au cœur du bassin maraîcher Nantais. Le centre d’expérimentation s’étend sur 6,5 ha, où sont essentiellement cultivés poireau, mâche et radis, mais également navet, laitue et oignon en plein champ ou sous-abris froids, ainsi que tomate et concombre sous serre. Le centre développe des programmes expérimentaux autour des cultures légumières en collaboration avec d’autres centres Ctiifl, des organismes de recherche partenaires ou pour le compte de firmes phytosanitaires. En plein champ, les thématiques abordées sont la protection phytosanitaire et le désherbage des cultures, la maîtrise de l’irrigation et de la fertilisation ou encore les techniques culturales. Le centre possède l’agrément BPE (Bonnes Pratiques d’Expérimentation) pour la réalisation d’Essais Officiellement Reconnus (EOR), dans le cadre de l’homologation de spécialités phytosanitaires. Il possède également la certification AB (Agriculture Biologique) pour 4 parcelles, afin de mener des essais sur la production biologique en cultures légumières. 9 000 m² de serres en verre et en plastique abritent notamment des cultures de tomate et concombre, avec pour thématiques l’étude du matériel végétal, l’économie d’énergie et la conduite du climat sous abri, la gestion de l’irrigation et de la fertilisation, le recyclage des solutions nutritives ainsi que la protection biologique et intégrée. L’unité de phytopathologie possède quant à elle un laboratoire de microbiologie et 4 chambres de culture végétale. Ces installations permettent la mise en place d’essais en conditions contrôlées, l’identification des agents pathogènes, la confection d’inoculum pour les essais, la conservation de souches.[3] Avec ses équipements spécialisés, les missions du centre de Carquefou sont donc axées sur différents thèmes : Tomate et concombre hors sol sous serre, Poireau et mâche en plein champ, Qualité en culture et environnement, Agrobiologie en production maraîchère et Qualité technologique et commerciale. Il emploie 36 personnes, dont 22 ingénieurs et techniciens et 7 ouvriers.

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

1. La tomate

1.1. Origine

La tomate *Lycopersicon esculentum* L est une plante herbacée monoïque, diploïde ($2n=24$), originaire d'Amérique de sud, (Fruits et légumes, 2010). Aujourd'hui très répandue dans le monde entier, sous presque toutes les latitudes, elle est bien adaptée aux conditions pédo-climatiques avec le développement de la sericulture. C'est une plante d'un grand intérêt non seulement par sa productivité élevée et la qualité gustative et nutritionnelle de ses fruits (sources de vitamines C, carotène et lycopène) mais également grâce à ses facultés d'adaptation à différentes régions.

LA TOMATE

La tomate ; *Lycopersicon esculentum* est une plante angiosperme, appartenant à l'Ordre des Solanales, la Famille des Solanaceae, le Genre Lycopersicon



1.2. Morphologie et physiologie

La plante tomate (Fig. 2) est une liane formée d'un port rampant et grimpant avec des feuilles composées en folioles et longues. Le système racinaire est de type pivotant à tendance fasciculée dense et ramifiée et peut atteindre 1m en profondeur. La distribution spatiale du système racinaire dépend des caractéristiques agronomiques du sol et des modalités d'irrigation. Il existe des tomates dites à croissance déterminée et d'autres à croissance



Figure 2 : Morphologie de *Lycopersicon esculentum*

indéterminée (Atherton et al, 1986). Pour les variétés déterminées, la floraison est regroupée sur une période limitée, suivie de la croissance des fruits. Alors que pour les variétés indéterminée, les bouquets floraux apparaissent régulièrement après la formation de trois feuilles, l'ensemble constituant le sympode, un bourgeon axillaire se développant après l'initiation florale du bourgeon terminal. Les inflorescences sont des grappes. Les fruits des tomates, sont des baies normalement à deux loges, parfois trois ou plus, à graines très nombreuses. Ils adoptent des formes et des tailles très variées (Milkanowski, 1999). La tomate est cultivée, en plein champ ou sous abris (sous tunnels froids, serres chauffées). Le cycle végétatif de graine à graine est court et d'environ 3 à 4 mois.

1.3. Production et qualité des fruits de tomates

Le rendement de la culture de tomate est fortement lié aux facteurs environnementaux, et peut être affecté par une variation du poids moyen des fruits et/ou du nombre de fruits par plante (Hao *et al* 2000). La maturation du fruit commence lorsque le fruit a atteint sa taille finale, et se manifeste par des changements importants, notamment de couleur, de fermeté et de composition (Grierson et Kader, 1986). Au cours de la maturation, les hexoses s'accumulent notamment le glucose et le fructose et les teneurs en acides diminuent. Les teneurs en sucres et en acides sont des éléments déterminants de la qualité organoleptique.

La composition du fruit peut être modifiée en fonction de la conduite culturale et du climat. Plusieurs études sur tomate ont montré que l'augmentation de la conductivité électrique de la solution nutritive, améliore la qualité des fruits (Adams, 1987; Dorais et al., 2008) en augmentant la teneur en matière sèche et la concentration en sucre des fruits. En tant que facteurs très importants pour l'élaboration du rendement et la qualité du fruit, l'impact du rayonnement (Cockshull, 1988), de la température (Pearce *et al.* 1993) et de l'humidité ont été étudiés. En effet, une réduction du rayonnement, et par conséquent de la photosynthèse, entraîne une baisse des teneurs en matières sèche et en sucres du fruit (Blanc, 1986). La température est le facteur le plus déterminant dans la production de la tomate (Chibane, 1999). Au dessus de 30°C, le lycopène, pigment responsable de la couleur rouge de fruit, ne s'accumule plus. C'est β - carotène qui se forme donnant ainsi une coloration jaune-orange au fruit. L'enrichissement en CO₂ améliore à la fois la production et la qualité des fruits avec des teneurs en sucres totaux et solubles augmentées.

La filière fruit et légumes en frais se caractérise par l'importance des critères de qualité 'individuelle' du produit (unité de consommation) avec de très fortes contraintes (coloration, calibre) et l'attente de plus en plus grande des consommateurs pour les fruits et légumes de haute qualité organoleptique, parfaitement sains (absences de pathogènes, de toxines et de résidus de pesticides) et ayant une bonne valeur nutritionnelle, pouvant participer à la protection contre les maladies (Gautier *et al.*, 2008).

2. Intérêts économiques

La tomate est une culture maraîchère de grande importance mondiale. C'est le troisième légume cultivé, et le second légume le plus consommé. Elle couvre 3,5 millions d'hectares à travers le monde, pour une production de 105 millions de tonnes (2007) (Tableau 1, Annexe 1). Les principaux pays producteurs sont la Chine (33 millions de tonnes produites), les Etats-Unis (14 millions), la Turquie (10 millions) et l'Inde (8,6 millions) qui représentent à eux seuls près de 50% de la production mondiale. A l'échelle de l'Europe (troisième zone de production avec 20% de la production mondiale soit 15 millions de tonnes/an), la France est placée 6^{ème} des producteurs européens avec une production de 700 000 tonnes en 2007, après l'Italie (6 millions tonnes produites) et l'Espagne (4 millions), mais qui reste insuffisante vis-à-vis de la consommation qui s'élève à 1,6 millions de tonnes (FAO, 2007). En France, trois grands bassins de production existent, grand Ouest, Sud-Ouest et Sud-Est (Ctifl, 2007). En ce qui concerne les mouvements commerciaux, la France importe principalement des tomates venant du Maroc, d'Espagne et de la Belgique tandis qu'elle exporte vers l'Allemagne et l'Italie.

3. Intérêts nutritionnels

La tomate est un aliment diététique, très riche en eau (près de 95 %) et pauvre en calories (15 kCalories pour 100 grammes). Pour 100g elle fournit en effet : 0,8g protides, 2,8g glucides, 0,1g lipides, 1,2 g fibres [4]. Elle est peu énergétique, mais par contre très riche en vitamines et minéraux. Elle est une excellente source de vitamine C (18 mg pour 100 g) et de vitamine E, ainsi que de provitamine A (qui joue un rôle primordial dans les mécanismes de la vision, intervient également dans la régulation de l'expression des gènes [5]) ou de β -carotène et de lycopène qui joueraient un rôle dans la réduction de l'occurrence de certains cancers (Giovannoni, 2002). Elle est également très riche en minéraux et oligo-éléments, et tout particulièrement en potassium (226mg pour 100g) qui contribue au bon fonctionnement rénal. Les fibres de la tomate, essentiellement concentrées dans la peau et les graines, avoisinent 1,2 g pour 100g. Elle participe donc au bon équilibre du régime alimentaire.

4. Système de culture de tomate

Les modes de cultures sont extrêmement variés, avec d'une part la production de tomate en plein champ, presque exclusivement destinée à la transformation, et d'autre part la production de tomate en tunnels froids et en serres, destinée à la consommation en frais (Najla, 2009). Ce dernier système de production constitue une part croissante de la production mondiale de tomates fraîches afin de répondre aux besoins d'une consommation en augmentation.

4.1. Culture sous serre

Une serre est une enceinte destinée à la production agricole hors sol, permettant de créer un climat favorable, très fortement artificialisé, avec un degré de maîtrise élevé du milieu et de nombreux actes techniques réalisées à l'échelle de la plante individuelle. Cette maîtrise climatique permet d'avoir une production précoce en contrôlant l'environnement aérien avec la maîtrise de la température, (Pearce *et al.*, 1993 ; De Konning, 1994 ; Venema *et al.* 2000) du rayonnement (Cockshull, 1988) de la photopériode, de l'humidité (Hoffman, 1979) et de la concentration en CO₂. Tout en respectant les besoins de la plante, il est aujourd'hui important de diminuer la consommation d'énergie dans les serres de production, du fait de l'augmentation du coût de l'énergie et des nouveaux objectifs de réduction des atteintes à l'environnement.

↳ Durabilité environnementale : elle correspond à une attente sociétale forte, qui conditionne l'acceptabilité de la production sous serre par le consommateur, à travers des aspects de limitation des rejets de gaz à effet de serre, ainsi que des rejets liquides et solides, afin d'avoir un système plus clos et autonome.

↳ Durabilité économique : elle doit être rendue possible à travers l'accroissement de la compétitivité : l'augmentation de la productivité et de la qualité d'une part, et la diminution des charges d'autre part (Brajeul *et al.*, 2005).

4.2. Durabilité de la production sous serre

La production sous serre chauffée est la branche de l'agriculture la plus consommatrice en énergie. Elle se caractérise notamment par sa grande dépendance vis-à-vis des énergies fossiles : 25 à 40% du prix de revient en maraîchage (tomate), 5 à 12 % en horticulture. L'augmentation du prix des énergies fossiles a par conséquent particulièrement touché le secteur serriste. Entre 2004 et 2006 : +56 % pour le gaz naturel, +86 % pour le fuel, +60 % pour le butane et le propane, soit une augmentation du coût de 5 à 40 % selon les exploitations

(Mauguin, 2006). Le chauffage est aujourd'hui le deuxième poste en terme de dépenses après la main-d'œuvre. Actuellement, il est primordial d'optimiser la consommation d'énergie sous serre, sans cependant pénaliser trop fortement la plante, afin de réaliser des économies d'énergie tout en conservant le potentiel de production (Grisey et Brajeul., 2007). Ces observations conduisent les professionnels à s'interroger sur la viabilité de l'activité à moyen terme et sur la stratégie à adopter. De manière à gérer cette transition, les innovations techniques (plantinov'ser) doivent être réfléchies sous l'angle de la durabilité. Pour cela, il est possible soit de limiter les pertes d'énergie de la serre, de développer des pratiques culturales moins ou peu consommatrices, soit d'investir dans des systèmes de chauffage moins consommateurs.

4.3. Stratégies pour la réduction des dépenses énergétiques

↳ Utilisation des sources énergétiques renouvelables

Il existe plusieurs sources énergétiques alternatives aux énergies fossiles pour le chauffage des serres (Annexe 2).

↳ Ecrans thermiques

Il est intéressant de fermer les écrans thermiques la nuit et durant les journées trop froides, entre mi-décembre et fin mai pour éviter les déperditions de chaleur importantes vers l'extérieur (Annexe 3).

↳ Intégration de température

Le principe est basé sur la capacité des cultures à tolérer des déviations de températures instantanées relativement importantes par rapport à l'optimum. Il s'agit de confiner et donc d'augmenter la température de la serre pendant la journée pour profiter au maximum de l'énergie solaire. Ce surplus de température de jour, et donc d'énergie (jusqu'à 8 °C supérieur à l'optimum) sera compensé par une diminution des températures de nuit (Fig. 3). L'intégration est notamment utilisée lorsque les conditions extérieures sont froides et que l'énergie nécessaire à la satisfaction des consignes est coûteuse. Cette stratégie s'applique classiquement sur 24 heures, mais plusieurs travaux montrent que ce principe est également valable sur plusieurs jours sans préjudice pour la culture (Grisey et Brajeul, 2007). Les expérimentations menées depuis 2004 au Ctifl et plusieurs articles sur ce sujet annoncent que l'IT sur 24h permet d'économiser jusqu'à 20 % d'énergie. Ces économies d'énergie sont réalisées avec des IT modérées (diminution de la température de nuit jusqu'à 16 °C). De la même façon, une autre expérimentation menée aux Pays-Bas sur l'intégration température sur plusieurs jours (MTI : Multiday day Temperature Integration) a montré qu'une économie d'énergie de 5 % en janvier et de 12 % sur la période de février à octobre pouvait être réalisée (Van Den Berg *et al*, 2001). Ces conduites climatiques sont testées dans le but de ne pénaliser ni la culture, ni les rendements, ni la qualité des fruits. Mais l'intérêt de ces techniques, qui conduisent à une aération limitée durant la journée, réside également dans la possibilité d'augmenter le niveau de CO₂ sous serre afin de favoriser la photosynthèse. D'après les résultats obtenus au Ctifl de Carquefou, la stratégie d'intégration de température sur 24 heures ou sur plusieurs jours présente néanmoins quelques limites. En effet, l'humidité relative contenue dans l'air de la serre a tendance à augmenter à cause du fort confinement. Cette humidité relative plus importante liée à la conduite en intégration de température peut parfois provoquer de la condensation sur les fruits et les feuilles. Cette condensation se forme lorsque la température de la serre augmente de façon plus rapide que la température de la plante, ce qui accroît le risque de problèmes phytosanitaires et notamment le développement du botrytis (Salat, 2007).

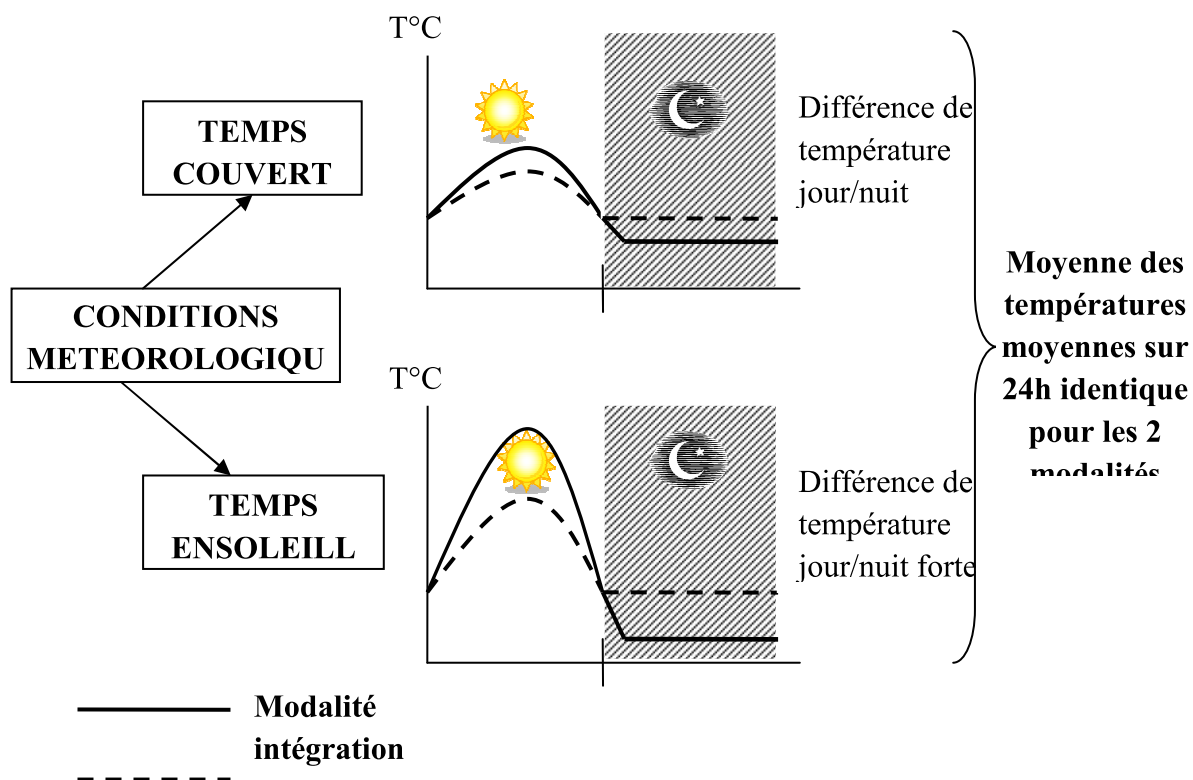


Figure 3: Représentation schématique de l'évolution de la température jour/nuit pour une modalité témoin et une modalité en intégration de température selon les conditions météorologiques. (Boulard, 2008)

C'est dans le cadre de cette stratégie que notre étude est menée. Actuellement, il existe un certain nombre de techniques validées pour réduire la consommation énergétique sous serre et d'autres en cours de validation. La combinaison de toute ou partie de ces technologies devra permettre de diminuer fortement les consommations énergétiques sous serre, avec comme aboutissement à moyen terme l'obtention d'une serre plus ou moins autonome vis-à-vis des énergies fossiles.

5. Effet de la température sur la culture de tomate

La température est le facteur le plus déterminant dans la production de la tomate, qui réagit énormément aux variations thermiques. Elle a un effet direct sur le développement de la plante et sur le métabolisme au sein du fruit et en conséquence sur leur composition et leur qualité gustative et nutritionnelle (Heuvelink and Dorais, 2005).

↳ Impact d'une température de serre trop basse

Les basses températures ($<10^{\circ}\text{C}$) ralentissent la croissance et le développement des plantes, entraînant un raccourcissement des entre-nœuds et la formation d'un feuillage abondant au détriment de la production. Une température basse peut entraîner aussi des ramifications des bouquets, difficultés de nouaison et formation des fleurs fasciées. Au dessous de 17°C , le pollen germe mal, surtout si l'humidité est faible (Chibane, 1999). Une température inférieure à 10°C inhibe l'accumulation du lycopène (Tomes, 1963). Dorais (2007) a montré qu'une période de basse température (15°C pendant 2-4h) diminue les teneurs en lycopène des fruits et leur activité antioxydante. Par conséquent l'utilisation des basses températures par les producteurs peut affecter la qualité des fruits.

☞ Impact d'une température de serre trop élevée

Les températures élevées favorisent la croissance de la plante au détriment de l'inflorescence qui peut avorter. La persistance d'un temps chaud et sec peut entraîner un allongement anormal du pistil, rendant ainsi une auto-pollinisation difficile. Au dessus de 30°C, le lycopène, pigment responsable de la couleur rouge de fruit ne se forme plus. Le β -carotène se forme donnant ainsi une coloration jaune-orange au fruit. D'autres études ont montré qu'un stress thermique apparaît à partir de 35°C, causant l'accumulation de composés phénoliques tels que les flavonoïdes et les acides hydroxycinnamique (Leyva *et al*, 1995). Il a été démontré que l'augmentation de la température entraînait également une augmentation des activités de certaines enzymes (réductase, catalase) et par conséquent des dégâts oxydatifs (Mondal *et al*, 2004). Récemment, Gautier et al (2005) ont montré que la charge en fruit a un effet sur la réponse des fruits à la température, ce qui laisse supposer que l'équilibre entre développement végétatif peut également jouer sur la réponse à la température.

☞ Impact de la température moyenne sur 24 heures

Pour la tomate de serre, la vitesse de croissance de la plante (De Koning, 1994) et des fruits (Pearce *et al.*, 1993) est intimement liée à la température moyenne journalière (TMJ). La TMJ doit être fixée selon l'énergie disponible et la demande des organes en croissance (De Koning, 1994). Des températures élevées accélèrent la vitesse d'apparition des feuilles et des fleurs, ainsi que le développement des fruits (accélération du flux phloémien du fait de l'augmentation de la force de puits, et diminution du taux de matière sèche dans les fruits). Cependant, des études ont montré que la hausse de température moyenne sur 24h permet une augmentation de rendement mais le calibre diminue (Papadopoulos, 2000). D'autres études ont montré qu'une haute TMJ sur 24h d'une plante chargée de fruits active le développement des fruits et diminue la vigueur de la plante. La température diurne/nocturne optimale de l'air ambiant s'établit à 20,8-21,0/18,5-19,0°C.

☞ Impact des écarts de température jour-nuit

Lorsque la plante entre en fructification, la répartition de l'énergie disponible entre les parties végétatives (feuilles) et reproductives (fruits) est influencée par le mode de réalisation de la TMJ. Autrement dit, l'écart de température jour/nuit influence le développement morphologique de la plante. Ainsi, les écarts jour/nuit élevés favorisent les parties reproductives et améliorent la qualité des fruits (Ayari *et al.*, 1999), tandis qu'un écart faible favorise une croissance végétative (croissance en hauteur et développement des axillaires favorisés). La température de nuit influence cependant la translocation du carbone fixé par la photosynthèse (Jiao et al., 1989, cité par Laniel et al, 2000). Il a été démontré que des températures plus chaudes que le jour, pour les premières heures de nuit, favorisent la migration des sucres de photosynthèse vers les tiges et les bourgeons plutôt qu'aux racines, ce qui provoque une augmentation de production.

MATERIELS ET METHODES

1. Dispositif expérimental

1.1. Les serres

Les modèles de serre utilisée sur le centre de Carquefou sont caractérisées par une hauteur importante afin de favoriser la transmission du rayonnement solaire, se sont des serres Serta, construites en 1995, mesurant 20m de longueur, 12.8m de largeur et la hauteur de l'abri sous chéneaux est de 4.2m, sur lesquelles se déroule notre étude « Intégration de température ». Elles sont équipées d'ouvrants discontinus, d'écrans thermiques, d'injecteurs de CO₂, d'un réseau de chauffage de haute température ainsi que d'un réseau de chauffage de la végétation.

1.2. Le système de chauffage

Le système de chauffage utilisé au centre de Carquefou est de type *open-buffer* (Annexe 4) et comprend pour chaque rang un tube d'acier (diamètre 51 mm) appelé thermosiphon ou chauffage aérien, positionné près du sol, complété par un tube qualifié de « chauffage de végétation » (ou plus généralement appelé *forcas*) placé dans la végétation. En effet, l'utilisation des tubes « thermosiphon » seuls induit des gradients de températures importants entre l'apex et les racines des plantes. L'utilisation des *forcas* permet de réduire ces gradients, et d'économiser un peu d'énergie en chauffant la plante plus directement.

1.3. Suivi de climat et énergie

Les données climatiques des serres sont mesurées par des sondes ventilées (Hortimax, Fig. 4) à raison de deux par compartiment, elles sont disposées au milieu de chaque serre, à environ 2m50 de haut. Elles renseignent sur la température ambiante, humidité relative de l'air et le taux de CO₂ dans le compartiment. Les données énergétiques sont mesurées à partir d'un compteur par compartiment et par réseau de chauffage.



Figure 4: Sonde de température d'air ventilée «EKTRON»

1.4. Gestion du climat et de la ferti-irrigation

Les capteurs microclimatiques sont reliés à un système informatique Multima-Synopta, fourni par la société Hortimax. Ce système intègre les données relevées par les capteurs Ektron, ce qui permet une supervision et un suivi de tous les paramètres de la serre, tels que la température, l'irrigation, l'apport en dioxyde de carbone, l'aération, mais également des conditions climatiques externes. En y entrant les consignes relatives à chaque facteur, le logiciel permet un pilotage du climat des serres, qui s'adapte en fonction des conditions extérieures, telles que l'ensoleillement ou la température. Complexe à mettre en place, un tel

système a donc une grande importance dans des conduites comme l'intégration de température, mais facilite aussi grandement le travail des professionnels.

La ferti-irrigation est gérée en système recyclé avec une gamme d'engrais liquides de marque SUBSTRAFEED (YARA). Elle est gérée par ordinateur, grâce à un ratio basé sur l'électro-conductivité du substrat, correspondant aux besoins de la plante. Des concentrations en différents éléments nutritifs sont ainsi calculées, et le mélange se fait automatiquement avec l'eau d'irrigation. Cette eau est en grande partie issue de la pluie et du recyclage des eaux de drainage. La fréquence d'irrigation dépend principalement des conditions climatiques externes, qui influent sur les besoins de la plante.

2. Le matériel végétal

L'étude a porté sur deux variétés de tomate à croissance indéterminée, Admiro et Plaisance.

✚ Plaisance est une variété commercialisée présentant une bonne vigueur, et pas de résistance.

✚ Admiro est une variété commercialisée plus générative et plus ouverte.

Les plans de tomate ont été cultivés en « double tête », c'est à dire que deux jeunes plantes sont greffées sur un unique porte-greffe d'une autre variété (Maxifort pour Admiro, Emperador pour Plaisance). Les plantes sont cultivées en hors sol sur un substrat inerte constitué de pains de laine de roche (MASTER GROTP) et de dimension 130*20*7,5. Les semis ont eu lieu le 22 octobre et la plantation le 29 décembre avec une densité de 1,2 plantes/m². La pollinisation est réalisée par des bourdons.

3. Conduite de l'essai : Intégration de température et plan expérimental

Notre étude repose sur l'effet d'une intégration de température poussée sur 24 heures. Dans une première serre (serre n°2), nous allons mettre en œuvre une intégration de température de niveau 1, avec un objectif de 18–18,5°C sur 24 heures. Cette intégration assez faible est proche des conditions présentes dans les serres des professionnels, et peut donc servir de témoin. Une intégration de température avec des écarts jour/nuits plus importants est mise en place dans une deuxième serre (serre n°4), avec un objectif de température moyenne sur 24h identique à la serre 2, afin de réaliser des économies d'énergie. L'intégration de température a été appliquée dès le 11 janvier et de façon plus marquée à partir de début avril. Les tomates sont plantées sur 9 rangs. Un rang à l'est et un rang à l'ouest servent de bordures. Les plantes sur lesquelles nous effectueront des mesures destructives (48 plantes d'Admiro et 24 plantes de plaisance) et non destructives (24 plantes Admiro et 24 pour Plaisance) sont disposées de manière aléatoire tout en évitant les plantes de bordures (Annexe 5). Un suivi du climat (température, l'humidité relative et la concentration en CO₂) est effectué quotidiennement alors que la consommation énergétique, est suivie hebdomadairement.

4. Description de l'architecture

4.1. Mesures destructives par prélèvement des plantes

Des prélèvements de plantes ont été réalisés à de quatre dates pour Admiro (15 Février, 20 Mars, 3 Mai, 15 Juin) et deux pour Plaisance (15 Février et 15 Juin). A chaque prélèvement douze plantes par géotypes ont été prélevées, à raison de six par modalité. Cela a permis de réaliser des mesures sur les différents organes de la plante (tige, feuilles et fruits).

↳ Les mesures sur tige

La plante prélevée est prise en photos (Fig. 5) puis le nombre de feuilles est compté. La plante est découpée en phytomère élémentaire, chaque phytomère étant constitué de l'entre-nœud inférieur de la tige, du rachis et des folioles. La masse fraîche de tous ces organes est pesée, puis ils sont mis à l'étuve à 80°C pendant 48h, puis pesés pour obtenir leur matière sèche.

↳ Les mesures sur feuilles

Des photos de feuille ont également été réalisées (Fig. 5), à raison d'une feuille sur trois. Les feuilles sont séparées de la tige et étalées sur un fond blanc, avec un régllet gradué servant d'échelle. Le logiciel de traitement d'image « **Image J** » version 1.36 développé par le « Wayne Rasband National Institutes of Health, USA » a été utilisé pour mesurer les longueurs, et largeurs des feuilles et des folioles, le nombre de foliole et la surface foliaire

↳ Les mesures sur fruit

Des mesures sont effectuées sur tous les fruits de tous les bouquets, avec les diamètres polaires et équatoriaux (**Fig. 6**) avec un pied à coulisse. Les mesures du poids frais des fruits sont réalisées puis, les fruits sont passés à l'étuve à 80°C pour la mesure du poids sec.



Figure 5 : Photos numériques de plante entière, feuille et bouquets prélevés pour les mesures destructives.

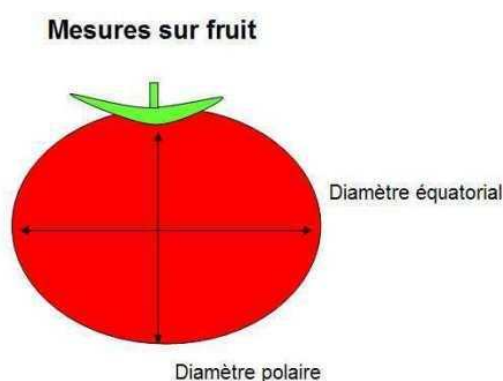


Figure 6: Schéma de tomate, définition des diamètres polaires et équatoriaux

4.2. Mesures non destructives

Les mesures ont été réalisées sur 24 plantes pour chaque génotype à raison de 12 plantes par génotype et par serre, tous les 14 jours depuis début février jusqu'à fin Mai.

↳ Mesure de l'index phyllochronique

Le nombre de feuilles par plante a été suivi au cours du temps pour pouvoir déterminer le phyllochrone (temps écoulé entre l'apparition de deux feuilles successives). On décompte, à l'instant t le nombre de feuilles dont la longueur est supérieur à un seuil (5cm). On mesure également la longueur de la dernière feuille dont la longueur est supérieure au seuil (nommée n) et la longueur de la première feuille inférieure au seuil (nommée $n+1$). La formule ci-dessous donne une estimation de l'index Phyllochronique (IP).

$$IP = n + (\log L_n - \log L_{\text{seuil}}) / (\log L_n - \log L_{n+1})$$

Avec : L_n : longueur de la feuille de rang n , L_{n+1} : longueur de la feuille de rang $n+1$

L_{seuil} : longueur de la feuille seuil

L'unité de mesure du temps (échelle des abscisses) est la somme de degré jour depuis la plantation avec une température seuil de 8°C (Bertin, 1993). La somme de température en degré jour est obtenue par le calcul suivant : $\text{Sigma_T} = \sum (TmJ - T^{\circ}_{\text{seuil}})$

Avec TmJ : température moyenne journalière

↳ Mesure Surface foliaire (SF)

L'évolution de la longueur d'une feuille sur 3 est mesurée. Ces mesures permettent d'estimer les vitesses de croissance ainsi que les dimensions finales des feuilles sur les différents phytomères. La surface foliaire est estimée à partir de la relation allométrique établie entre la longueur et surface des feuilles sur les plantes prélevées.

↳ Taille des fruits

Le suivi de la croissance du 2^{ème} fruit de tous les bouquets est réalisé via les mesures des diamètres de fruit. La masse fraîche des fruits est estimée par une relation empirique à partir du volume du fruit, lui même estimé à partir de mesures destructives sur fruits

$$\text{Masse fraîche du fruit} = 4/3 * 3,1415 * (\text{MOYENNE (DE, DP)} / 2)^3$$

Avec DE : diamètre équatorial et DP : diamètre polaire

Le suivi des diamètres permet ainsi l'estimation de la croissance en matière fraîche des fruits.

↳ Inclinaison des bouquets

Des photos de bouquet *in situ* au cours du temps (trois bouquets par plante) sont réalisées permettant la détermination de l'angle d'insertion tige bouquet (Figure 7 : Angle A) et l'angle d'inclinaison du bouquet (Figure 8: Angle B) à l'aide du logiciel Gimp (version 2.6 logiciel libre qui permet la mesure des angles sur les images).



Figure 7 : Mesure des angles d'inclinaison des bouquets suivis au cours de temps

↳ Interception de rayonnement

Le développement de la surface foliaire des plantes et son impact sur l'interception du rayonnement sont déterminés à partir de photos hémisphériques prises à 3 hauteurs et à différentes dates pour chaque traitement. Un logiciel de traitement (Can eye, version 5, Weiss et Baret, INRA Avignon) permet de calculer la fraction de trouées. Les fractions de trouées représentent le pourcentage de ciel observable dans le couvert végétal dans une direction zénithale donnée. Plus la fréquence de fraction de trouées est proche 1, plus la lumière pénètre dans le couvert végétal.

L'effeuillage des plantes est effectué toutes les 2 semaines à raison de 4 feuilles par tiges, qui sont ensuite mises à l'étuve 80°C pendant 48h puis pesées afin de déterminer leur matière sèche. A partir de fin Mars, le rendement de la culture est suivi par une récolte réalisée deux fois par semaine. Les tomates de chaque plante suivie sont récoltées au stade rouge clair (coloration 6-7 de l'échelle développée par le Ctifl), puis pesées avec mesure des diamètres.

5. Composition des fruits

L'effet de la conduite climatique sur la qualité des fruits a été évalué sur 24 plantes pour chaque génotype à raison de 12 plantes/ génotype/ serre. Les fruits ont été récoltés à 5 dates (12 Avril, 26 Avril, 17 Mai, 7 Juin et 29 Juin) puis caractérisés de façon physique par leur poids frais et leur coloration externe. Deux quartiers opposés par fruit ont été ensuite congelés dans l'azote liquide et conservés à -80°. Les échantillons ont été ensuite lyophilisés (Annexe 6) puis broyés. Les poudres végétales ainsi obtenues ont été utilisées pour déterminer les teneurs en acides et en sucres d'après Gomez et al. (2004, cité par Gautier et al., 2008) par HPLC après extraction dans le méthanol (Annexe 6).

6. Analyses statistiques

Les résultats obtenus ont été traités statistiquement par le Logiciel Exelstat. Une analyse de variance à deux facteurs prenant en compte le facteur génotype, le facteur conduite climatique et leur interaction a été réalisée, quand des différences significatives ont été observées la comparaison des moyennes a été effectuée par un test de Newman et Keuls au seuil de 5%.

Seule une partie des résultats a pu être dépouillée et analysée durant mon stage aussi très peu de données sur les mesures destructives seront présentées dans la partie résultats et discussion de mon rapport car elles sont en cours de dépouillement. En particulier, les données sur la répartition de la matière sèche ne seront pas présentées ainsi que les données sur les angles d'inclinaison et le travail sur la paramétrisation du modèle architectural qui sera réalisé plus tard. Par ailleurs, les données de poids frais du fruit et de coloration n'ont pas montré de différence significative selon la gestion climatique et n'ont pas été présentées.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

I. Gestion climatique et bilan énergétique

I.1.Bilan climatique

L'essai a pour objectif de limiter le coût de chauffage en réduisant la température de nuit et en augmentant la température de jour avec une moyenne identique des deux modalités sur 24 h. La température moyenne au cours de la saison varie, mais les températures moyennes sont identiques entre les modalités (Fig. 8). Les écarts entre températures de jour et de nuit dans les modalités avec intégration de température poussée démontrent également que les consignes climatiques ont permis un écart jour-nuit plus important en comparaison avec le témoin.

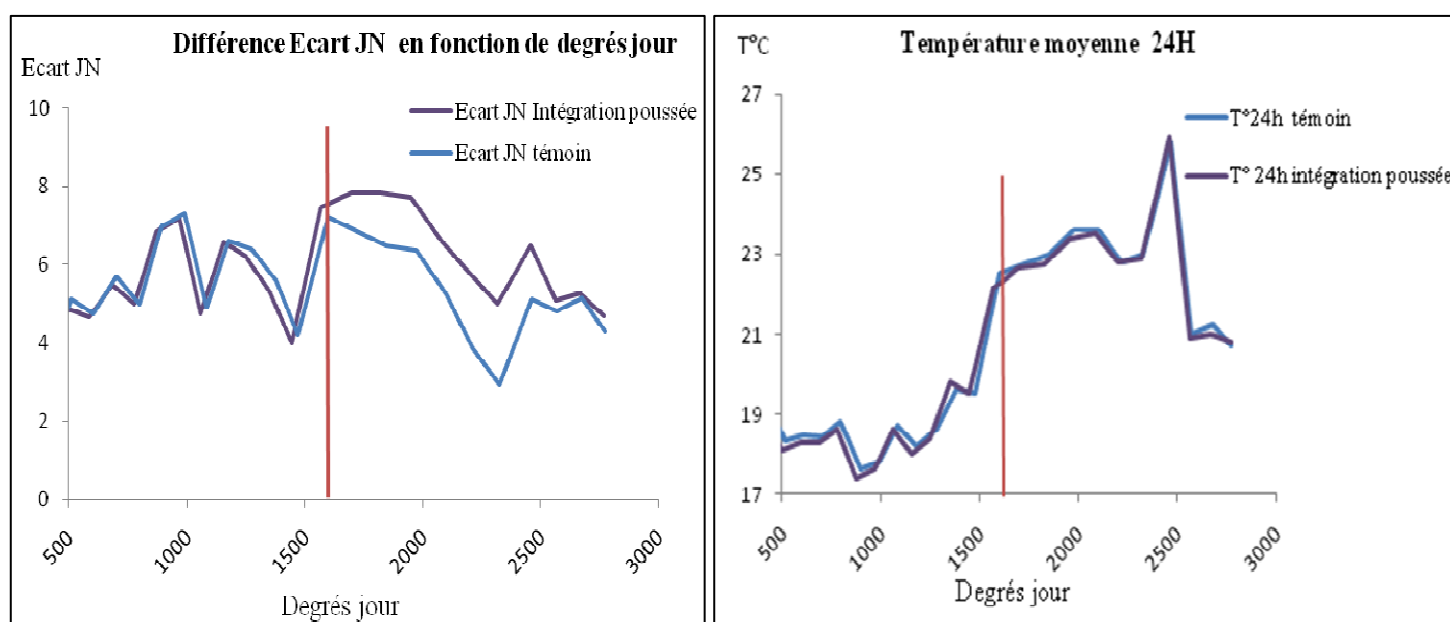


Figure 8: Evolution de la T° moyenne 24h et Ecart Jour Nuit en fonction de degrés jour

Trait rouge : représente début de la modulation de l'intégration de température

I.2.Consommation énergétique

Les consommations énergétiques se décomposent entre le chauffage au sol (rail sol) et les tubes de chauffage placés dans la végétation (forcas). La consommation énergétique pour les forcas des deux modalités ne montre aucune différence (Fig. 9). Par contre, des différences importantes sont observées au niveau des rails sol. L'économie d'énergie réalisée avec l'intégration de température est progressive tout au long de la culture, mais elle s'accélère à partir de la semaine 13 (Trait). Cette évolution peut s'expliquer par la possibilité de variation plus importante de la consigne de température de chauffage de nuit en intégration de température poussée, car la température de jour est plus élevée.

La conduite avec intégration de température a permis de réaliser une économie d'énergie de 20% par rapport à la conduite témoin.

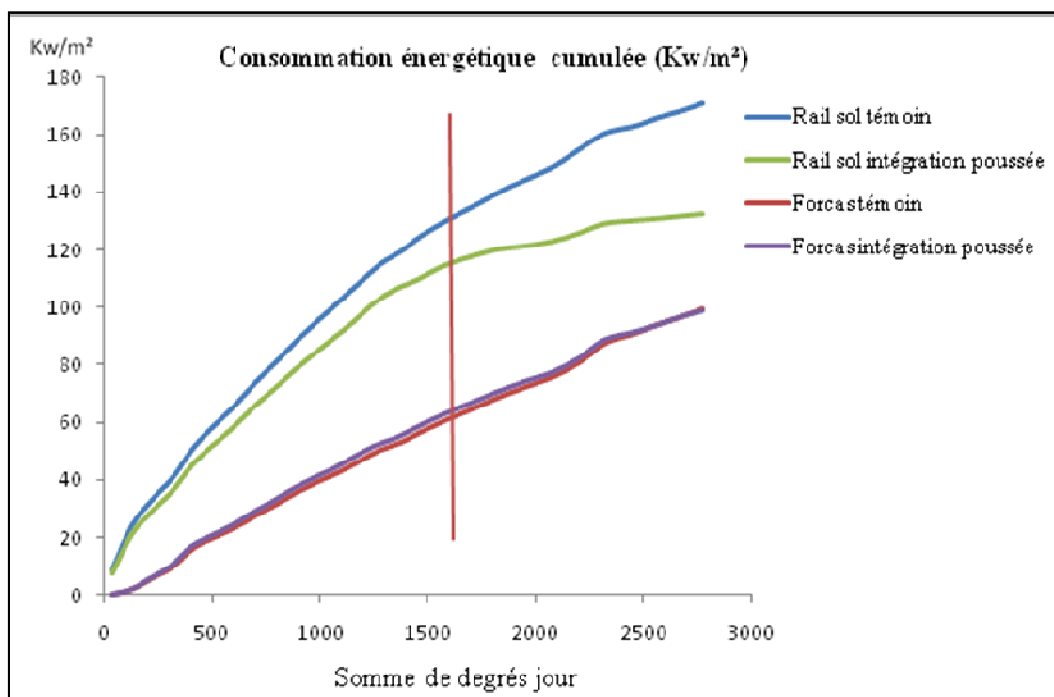


Figure 9 : Evolution de la consommation d'énergie cumulé (en kWh/m²)
 Trait rouge : représente début de la modulation poussée de l'intégration de température

I.3.Bilan économique

Afin de calculer les bénéfices réalisés, deux critères sont pris en compte , les économies d'énergie et la variation de rendement.

Tableau 1: Comparaison du rendement et des coûts de chauffage €/kg pour les deux variétés Admiro et Plaisance avec intégration poussée par rapport au témoin

| | Témoin | | Intégration poussée | |
|--|---------|-----------|---------------------|-----------|
| | Admiro | Plaisance | Admiro | Plaisance |
| Rendement kg/m² | 17,63 | 16,58 | 18,98 | 17,49 |
| Consommation énergie kW/m² | 234 | 234 | 221 | 221 |
| Coût de chauffage €/m² (2,48 cts/kW) | 5,62 | 5,62 | 5,31 | 5,31 |
| Coût de chauffage €/serre (2,48 cts/kW) | 1438,72 | 1438,72 | 1358,08 | 1358,08 |
| Coût chauffage €/ kg de tomate produite | 0,319 | 0,339 | 0,279 | 0,303 |

Tableau 2: Bilan économique en fonction de la conduite climatique et du génotype

| Bilan | Admiro | Plaisance |
|--|---------------|------------------|
| Amélioration du rendement par l'intégration poussée | +7,7% | +5,5% |
| Diminution de la consommation d'énergie par intégration poussée | +5,6% | +5,6% |
| Economie sur le coût du chauffage pour produire 1Kg de tomate | +12,4% | +10,5% |

Lors de l'intégration de température poussée, on note une augmentation de rendement pour les deux génotypes qui s'accompagne d'une réduction de la consommation d'énergie et par conséquent du coût de chauffage. Une conduite économe en énergie à travers la réduction de

chauffage montre une amélioration de rendement qui est loin d'être négligeable pour les deux génotypes, avec une augmentation plus marquée pour Admiro de l'ordre de 2% par rapport à Plaisance. ent de la culture de tomate ne semble donc pas être affecté par une économie de chauffage. Des résultats similaires ont été relevés dans le cas des cultures sous serre (Ctifl, 2008). L'économie d'énergie réalisée se double donc d'un bénéfice supérieur associé à l'augmentation des rendements par rapport au témoin.

II. Croissance et développement de la plante

II.1. Etude de l'index phyllochronique sur les plantes suivies au cours du temps

La figure 10 montre l'évolution de l'index phyllochronique, IP, en fonction de la somme de température après plantation. La pente a été calculée pour chaque courbe et un modèle linéaire de type $y=ax+b$ est proposé pour les différents traitements (exemple figure 10 : Plaisance intégration poussée). 'y' étant l'IP et 'x' une somme de degrés jour. Cette pente représente l'inverse du phyllochrone, c'est-à-dire la vitesse d'apparition des feuilles.

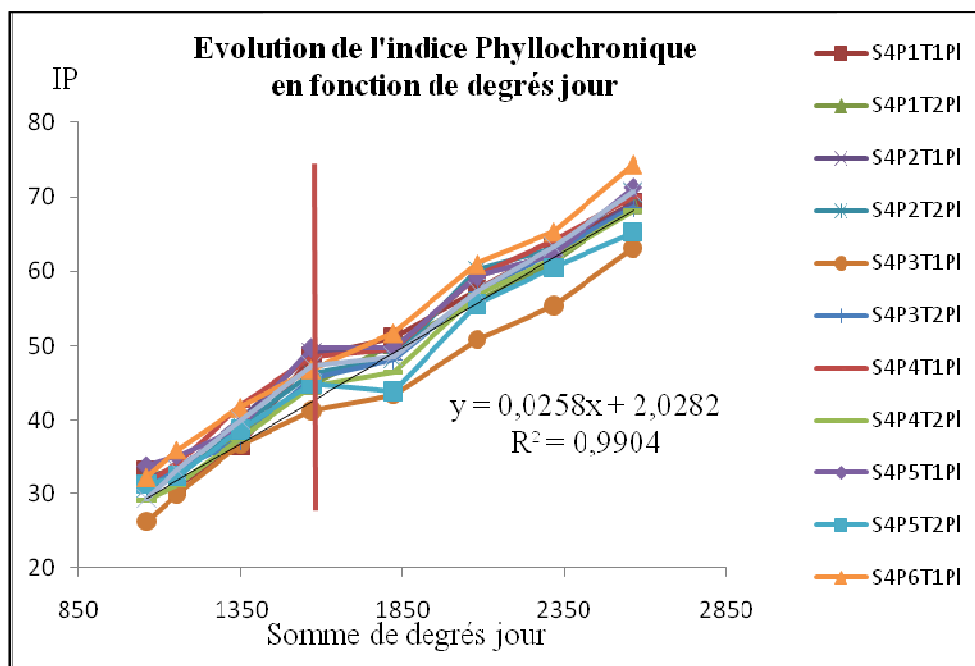


Figure 10: Evolution de l'Index Phyllochronique en fonction du temps exprimé en somme de degré-jour, cas de Plaisance en intégration poussée

Tableau 3 : Index phyllochronique (a) en fonction du génotype et du climat.

| Génotype | Témoin | | Intégration poussée | |
|-----------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| | a | R ² | a | R ² |
| Admiro | 0,0235 feuille/jour | 0,9664 | 0,0209 feuille/jour | 0,9217 |
| Plaisance | 0,0245 feuille/jour | 0,9911 | 0,0258 feuille/jour | 0,9904 |

La variété Plaisance a un rythme significativement plus rapide d'émergence des feuilles par rapport à Admiro ($P < 0,001$) avant et après l'intégration plus poussée (Tableau 3), mais la conduite du climat n'a pas affecté la vitesse d'émergence des feuilles (Fig. 11). Ces résultats

divergent des travaux de Cutforth *et al.* (1993), qui ont montré une diminution du phyllochrone et du nombre de feuilles de blé avec l'élévation de la température.

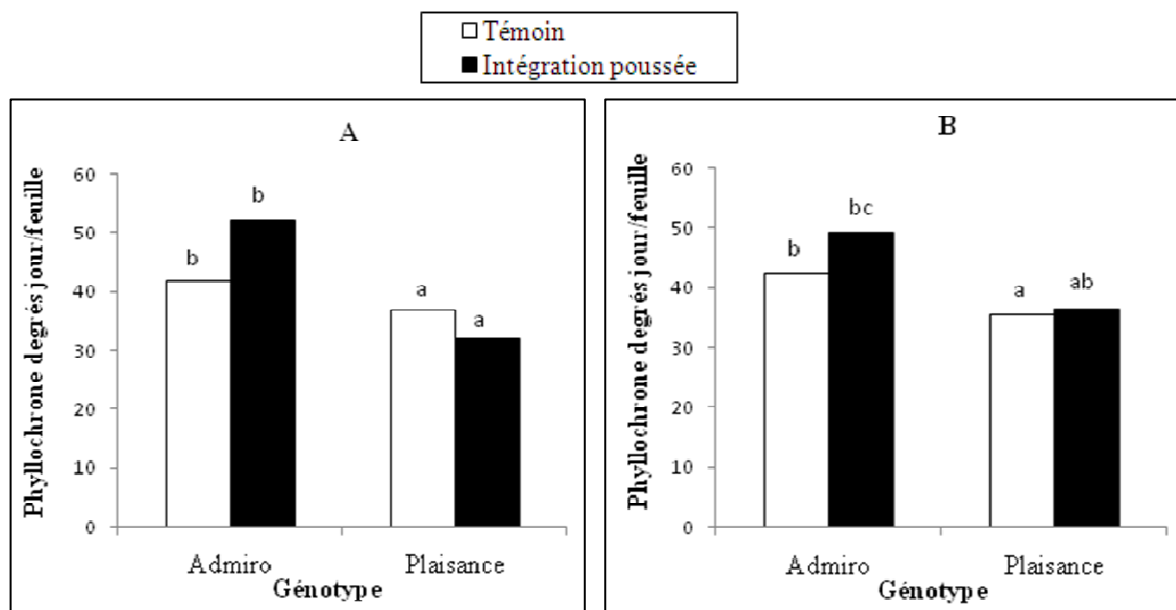


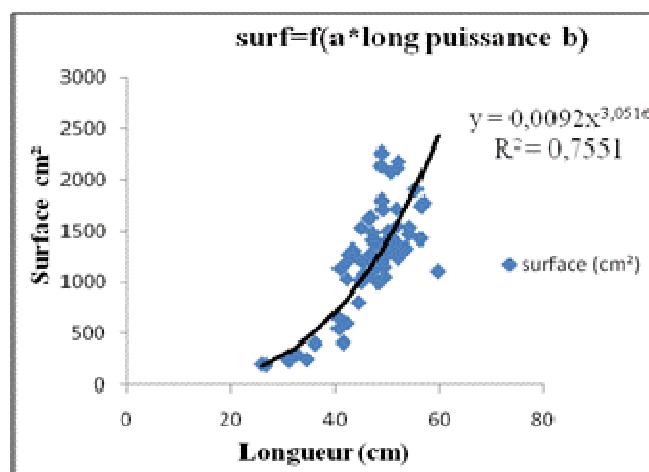
Figure 11: Phyllochrone exprimé en degrés jour par feuille pour Admiro et Plaisance en intégration de température modérée (témoin) et poussée. A : Avant Avril. B : Après Avril, Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil $p < 0,05$

II.2. Croissance foliaire

Une relation allométrique entre la surface foliaire et la longueur des feuilles a été établie pour les premières récoltes en utilisant une fonction puissance (Fig. 12).

Figure 12 : Relation entre surface et longueur des feuilles :

$y = 0,0092x^{3,0516}$ avec y la surface (cm^2) de la feuille, et x sa longueur (cm)



Cette relation a été permis d'estimer l'évolution de la surface foliaire au cours du temps à partir des longueurs de feuilles. La figure 13 montre une diminution significative de surface foliaire pour Admiro au cours du temps qui pourrait être expliquée par l'effeuillage de la plante. Par contre aucune différence significative de surface foliaire n'a été enregistrée pour les deux génotypes entre la conduite témoin et l'intégration de température poussée.

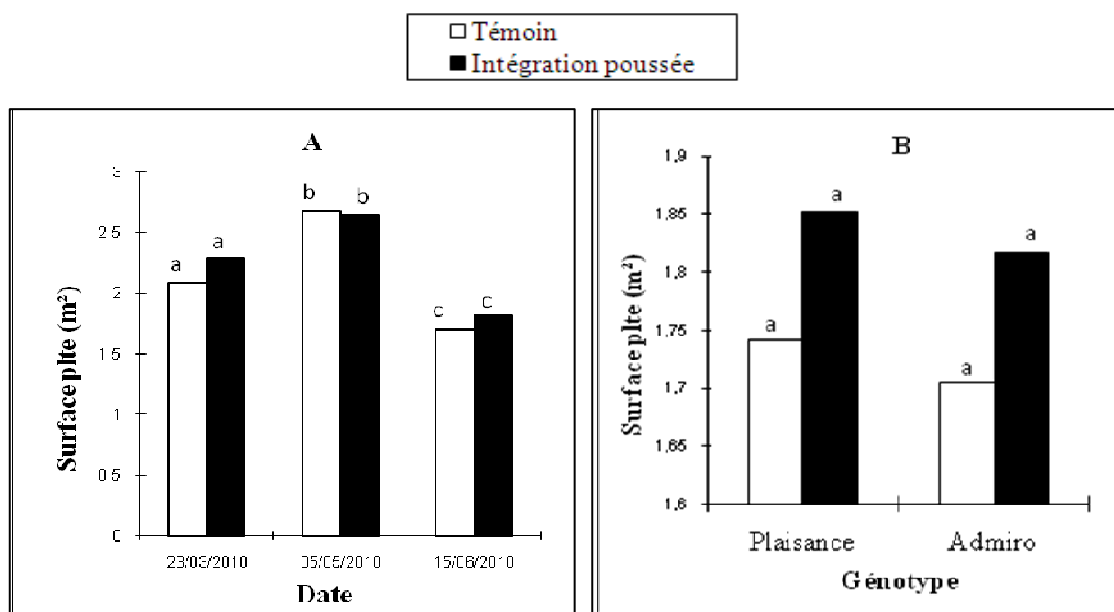


Figure 13 : Evolution de la surface foliaire pour Admiro (A) et pour les deux génotypes en Intégration de température modérée (témoin) et poussée (B)
Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil $p < 0,05$.

L'impact de la conduite climatique sur la répartition de la surface foliaire a été analysé sur les photographies hémisphériques (Annexe 7) prises en fin d'expérimentation. Le couvert ayant poussé en condition d'intégration de température poussée intercepte moins de lumière que le témoin, la fréquence de trouées étant plus grande (Fig. 14). L'intégration poussée a donc réduit la surface foliaire et/ou augmenté sa porosité. Ces résultats divergent de ceux retrouvés précédemment (Fig. 14) et pourraient être expliqués par une différence de hauteur des plantes et d'agencement des feuilles. Ils confirment le caractère plus végétatif de Plaisance et soulignent que l'intégration poussée réduit le rayonnement intercepté par la plante, ce qui pourrait avoir des conséquences sur la photosynthèse de la plante, et sa production de matière sèche.

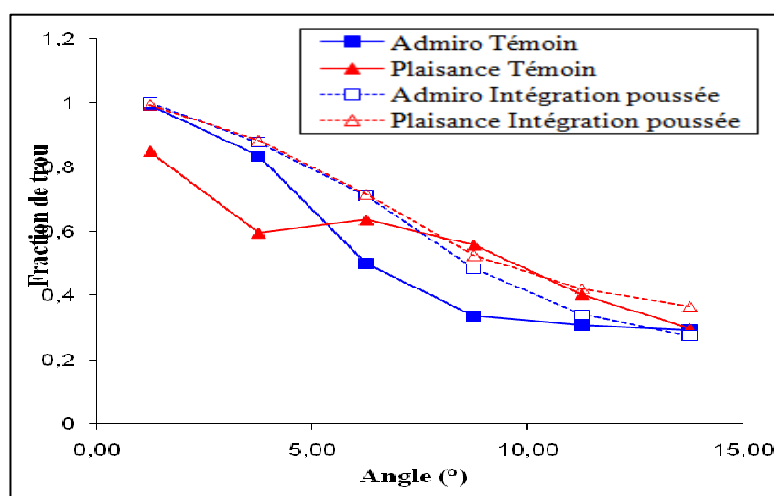


Figure 14: Fraction de trouée moyenne en fonction de la conduite climatique et du génotype

II.3. Croissance de la plante

La variété Plaisance produit plus de feuilles ($p < 0.0001$) et des entrenœuds plus longs qu'Admiro en début (Fig. 15A) et en fin d'expérimentation (Fig. 15B).

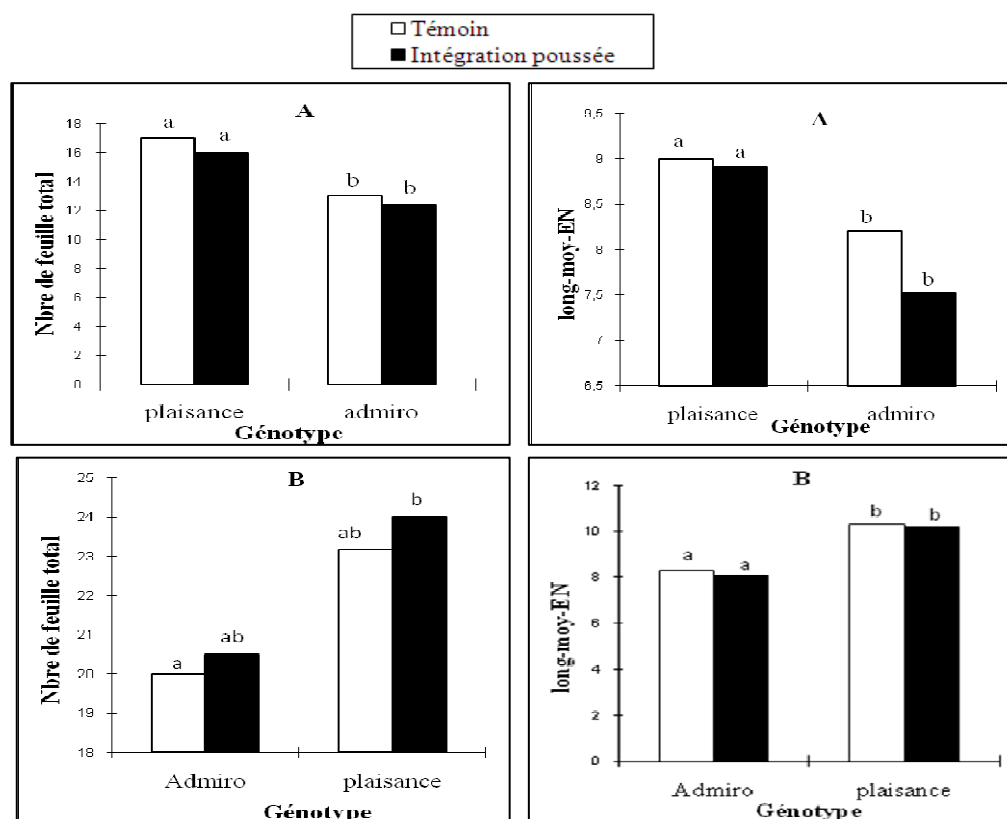


Figure 15 : Nombre de feuilles et longueur moyenne des entre-nœuds en fonction des génotypes et de la conduite climatique. A : Avant début avril. B : Après début avril
Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil $p < 0,05$.

Par contre au début de l'expérimentation il n'y a pas de différences en fonction de la gestion climatique. Par contre, en fin d'expérimentation, une légère augmentation du nombre de feuilles apparaît pour les plantes soumises à une intégration de température poussée qui pourrait être accentuée avec une prolongation de traitement. Durant la période de croissance, comme le mentionnent Wacquart *et al.*, 1995, un abaissement de la température favorise la vigueur et la croissance de la plante.

III. Suivi de la Qualité des fruits

III.1. Teneur en matière sèche des fruits

La figure 16 montre la variation de la teneur en matière sèche des fruits récoltés pour les deux génotypes selon la gestion climatique pour les différentes récoltes. Les analyses effectuées à chaque date de récolte ne montrent pas de différence significative sur les teneurs en matière sèche pendant les premières récoltes. On note également qu'il n'y a pas de différences de teneurs en matière sèche entre les deux génotypes. En fin d'expérimentation, l'intégration poussée a induit une diminution significative de la teneur en matière sèche pour

Plaisance, et de façon non significative pour Admiro. Ces différences de teneurs en matières sèches peuvent résulter de différences d'interception du rayonnement et il serait intéressant de les confirmer par les mesures de répartition de matière sèche aérienne en fonction des traitements en fin d'expérimentation. Ces différences de teneur en matière sèche peuvent refléter des différences de composition notamment en sucre et en acide.

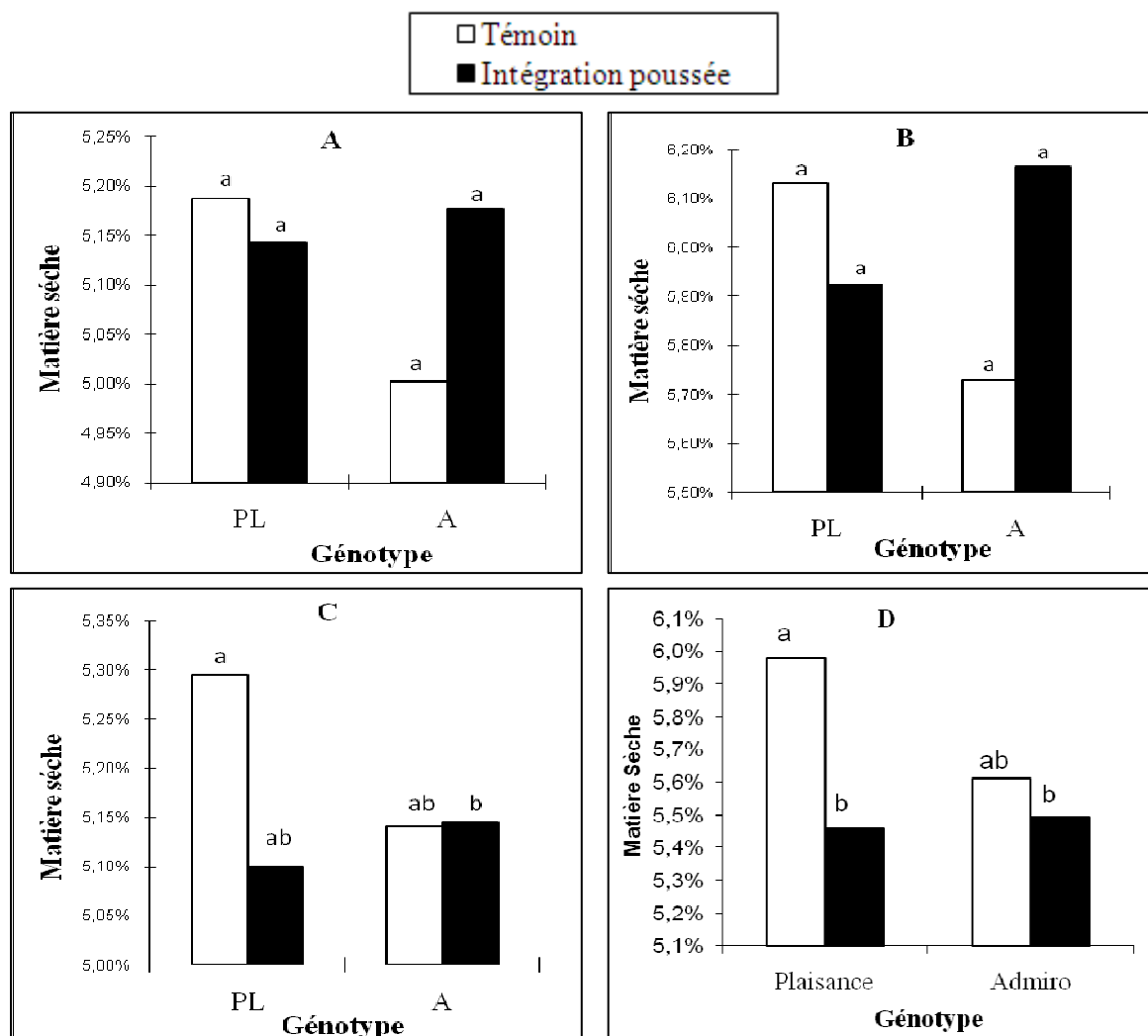


Figure 16 : Evolution de la teneur en matière sèche pour Admiro et Plaisance en Intégration de température modérée (Témoin) et poussée pour différentes dates de récoltes

A : récolte 12 avril. B : 26 avril ; C : 7 juin ; D : 29 juin

Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil $p < 0,05$.

III.2. Composition biochimique en sucres et en acides

Quel que soit le génotype, une intégration de température poussée réduit significativement les teneurs en sucres et en acides (Fig. 17). Des résultats contradictoires ont été observés dans le cas des écarts jour-nuit élevés sur la tomate qui favorisent les parties reproductives en assurant une répartition plus importante de la biomasse vers les fruits (Ayari *et al.*, 1999) et par conséquent une meilleure qualité. Afin d'affiner l'analyse, les sucres solubles sont analysés séparément ainsi que les acides. Les deux génotypes présentent les mêmes teneurs en

sucres. Une intégration de température poussée entraîne une baisse significative des teneurs en glucose et fructose. Tandis que le saccharose ne semble pas être affecté par le traitement (Annexe 8). De même, les teneurs en acides citrique et quinique montrent une diminution en intégration poussée, alors que l'acide malique ne varie pas.

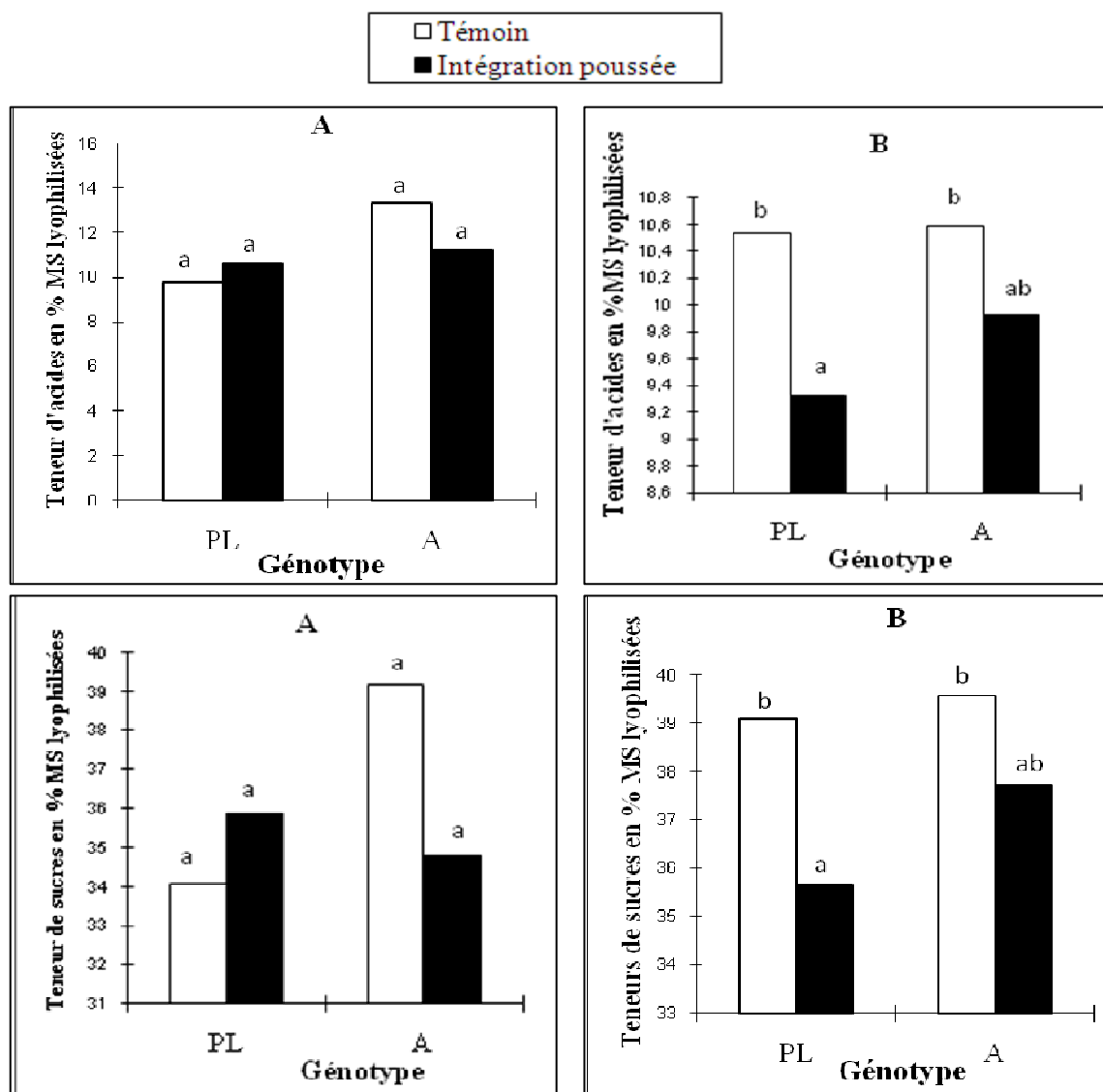


Figure 17 : Evolution de la teneur en acides et sucres solubles pour Admiro et Plaisance en Intégration de température modérée (Témoin) et poussée. A: Avant avril. B: en fin d'expérimentation. Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil $p < 0,05$.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Avec l'augmentation régulière du prix des combustibles depuis 2004, la maîtrise énergétique constitue un enjeu important pour les cultures sous serre. En effet, le chauffage occupe le deuxième poste de dépenses après la main d'œuvre dans ce type d'exploitations maraîchères. Pour répondre à cette problématique, le projet Plantinov'ser a été mis en place pour une bonne gestion énergétique et l'optimisation climatique sous serre.

Nos résultats montrent l'avantage de cette intégration poussée en terme d'économie d'énergie, et d'amélioration du rendement sans affecter le rythme de développement de la plante. Par contre, nous avons constaté une réduction du rayonnement intercepté par la plante (fraction de trouée plus importante) lors de l'intégration poussée de température et une diminution de la matière sèche des fruits récoltés notamment sur le génotype le plus végétatif Plaisance et une tendance similaire non significative sur Admiro.

Cette étude a donc mis en évidence un effet négatif sur les teneurs en matière sèche résultant de différences de composition biochimique marquée par la réduction des sucres (glucose, fructose) et acides (acides citrique et quinique).

Les résultats portent à conclure qu'il est nécessaire de prendre en compte les effets d'une telle économie d'énergie sur la qualité des fruits, si l'on veut produire des fruits de qualité en situation plus respectueuse de l'environnement avec un coût de chauffage moindre. Choisir des génotypes plus végétatifs pourrait être une solution si les résultats de cette étude se confirment sur un plus large choix de génotypes et de portes greffe l'année prochaine.

L'analyse des données va se poursuivre afin de confirmer l'impact de la gestion climatique sur la répartition de la matière sèche dans la plante et en particulier dans les fruits. A partir des données acquises lors de ce stage on pourra paramétrer un modèle décrivant l'architecture et le développement de la plante de tomate sous deux régimes de gestion climatique différents (témoin et une intégration de température poussée). Par la suite il sera intéressant de coupler le modèle architectural avec le modèle de qualité des fruits en intégrant des lois de réponses de la composition du fruit en fonction de la température. Il sera alors possible de tester l'influence des conduites culturales sur la croissance de la plante et les conséquences sur la qualité des fruits. Ce modèle pourrait servir d'outil d'interprétation de l'impact de la température sur la composition des fruits.



Références Bibliographiques

- [1] Extrait du description détaillé de projet « Innovation végétale et agro système serre économe en énergie PLANTINOV'SER » 2008.
- [2] <http://www.avignon.inra.fr/internet>
- [3] www.ctifl.fr
- [4] <http://www.aprifel.com>
- [5] http://www.afssa.fr/ouvrage/fiche_apports_en_vitamine%20A.html
- Adams P, 1987.** The test of raised salinity. *Grower* **107**: 23–27
- Atherton J.G et Harris G.P, 1986.** Flowering in the tomato crop (Atherton and Rudich, Eds), Chapman and Hall, London, p 167-194.
- Bertin N, 1993.** Analysis of the tomato fruit growth response to temperature and plant fruit load in relation to cell division, cell expansion and DNA endoreduplication. *Ann. Bot.* **95**: 439–447
- Blanc D, 1986.** The influence of cultural practises on the quality of the production in protected cultivation with special references to tomato production. *Acta Hort.* **191**: 85–98
- Boulard F., 2008.** Réduction de la consommation énergétique et maîtrise des conditions climatiques en culture de concombre sous serre. mémoire de l'université de Nantes. 38.
- Brajeul E, Grisey A., Le Quillec S., Grassely D., Letard M. ; 2005.** *L'innovation technique.* Infos. N° 214, 43-49.
- Chibane A, 1999 ,** Fiche Technique: Tomate sous serre Bulletin Mensuel de Liaison et d'Information du PNTTA réalisé à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Responsable de l'édition: Prof. Ahmed Bamouh. Programme National de Transfert de Technologie en Agriculture (PNTTA) N° 57 Juin 1999.
- Cockshull KE, 1988.** The integration of plant physiology with physical changes in the greenhouse climate. *Acta Hort.* **229**: 113–123
- Cutforth HW, Y. W. Jame, and P. G. Jefferson, 1993.** Effect of temperature, vernalization and water stress on phyllochron and final main-stem leaf number of HY320 and Neepawa spring wheats. Published by the Agricultural Institute of Canada. Volume 72, Number 4. p 1141-1151.
- De Konning ANM, 1994.** Development and dry matter distribution in glasshouse tomato : a quantitative approach. Thesis, Wageningen Agriculture University. Wageningen Pers. Wageningen, The Netherlands : 240pp.
- Dorais, M. (2007).** "Organic production of vegetables: State of the art and challenges.", 2007 Annual Meeting of CPS-SCP (with Plant Canada 2007), Saskatoon, SK, Canada, June 10-14, 2007,
- Dorais, M., Ehret, D.L., and Papadopoulos, A.P. (2008).** "Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: from the seed to the consumer.", *Phytochemistry Reviews*, 7(2), pp. 231-250
- FAO, 2003.** Agriculture mondiale : Horizon 2015/2030. Une étude de la FAO, édité par J.Bruinsma. Rome, FAO et Londres, Earthscan.
- Fruits et légumes (en ligne).** Disponible sur <http://www.fruits-et-legumes.net>. Consulté le 02.07.2010
- Gautier H, Diakou-Verdin V, Benard C, Reich M, Buret M, Bourgaud F, Poëssel JL, Caris-Veyrat C, Genard M, 2008.** How Does Tomato Quality (Sugar, Acid, and Nutritional Quality) vary with ripening stage, temperature, and irradiance? *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **56**: 1241-1250.
- Gautier H, Rocci A, Buret M, Grassely D, Dumas Y, Causse M, 2005.** Effect of photosensitive filters on the physical and chemical traits of vine-ripened tomato fruits. *Can J Plant Sci* **85**: 439-446.

- Giovannoni J, 2002.** Molecular biology of fruit maturation and ripening. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 52: 725-749.
- Grisey A., Brajeul E., 2007.** Serres chauffées : réduire ses dépenses énergétiques. éditions Ctifl. Paris. 175.
- Grierson D, Kader AA, 1986.** Fruit ripening and quality. In: Atherton, JG; Rudich, J. (Eds). The tomato Crop. A Scientific Base for Improvement. Chapman et Hall, London, pp.241-280.
- Hao X, Papadopoulos AP, Dorais M, Ehret DE, Turcotte G, Gosselin A, 2000.** Improving tomato fruit quality by raising the EC of NFT nutrient solutions and calcium spraying: effects on growth, photosynthesis, yield and quality. Acta Hort. **511**: 213–224
- Heuvelink E, Dorais M 2005.** Crop growth and yield. In: Heuvelink E (ed) Tomato. Crop production science in horticulture series, no. 13 CAB International, Walling, Oxon, UK, 252pp.
- Hoffman GJ, 1979.** Humidity. In: Tibbits, T.W. and Kozlowski, T.T. (eds) Controlled Environment Guidelines for Plant Research. Academic Press, London, pp. 141–172.
- Leyva A, Jarillo J A, Salinas J, Martinez-Zapater J M, 1995.** Low temperature induces the accumulation of Phenylalanine Ammonia-Lyase and Chalcone Synthase mRNAs of Arabidopsis thaliana in a light-dependent manner. Plant Physiology 108: 39-46
- Mauguin P. ; 2006.** Assurer le développement durable des productions sous serres, propositions pour la mise en œuvre d'un plan national « serres-énergies ». Paris: Editions du GREF.
- Mikanowski L et P.; 1999. *Tomate*.** Paris : Editions du Chêne.
- Mondal K, Sharma N S, Malhotra S P, Dhawan K, Singh R, 2004.** Oxidative stress and antioxidant systems in tomato fruits during storage. Journal of food Biochemistry 27 (6): 515-527.
- Najla S, 2009.** Thèse, Analyse et modélisation de la croissance de la plante et du fruit de tomate, Application à des niveaux de salinité et de disponibilité hydrique variable. Unité Plantes et Systèmes de Cultures Horticoles, INRA Avignon, P1.
- Papadopoulos et Xiuming H, 2000.** Effects of day and night air temperature in early season on growth, productivity and energy use of spring tomato. Agriculture and Agri-food Canada, Greenhouse and processing Crops research Centre. 25october 2000.
- Pearce BD, Grange RI, Hardwick K, 1993.** The growth of young tomato fruit. II Environmental influences on glasshouse crops grown in rockwool or nutrient film. J. Hortic.Sci. Hort. **68**: 13–23.
- Salat A., 2007.** L'intégration de température pour une économie d'énergie. PHM. **487**. 18 23.
- Tomes ML, 1963.** Temperature inhibition of carotene synthesis in tomato. Bot Gaz 124: 180-185.
- Van Den Berg G.A., Buwalda F., Rijpsma E.C., 2001.** Practical demonstration multi-day temperature integration. Praktijkonderzoek plant & omgeving. 24-28.
- Venema JH, Villerius L, Van Hasselt PR, 2000.** Effect of different water supply on plant growth and fruit quality of Lycopersicum esculentum. J. Plant. Nutr. Soil Sci. 162: 583-588
- Wacquart C., Zuang H., Baille A., Dumoulin J. et Trapateau M., 1995.** Maitrise de la conduite climatique. Tomate sous serre et abris en sol et hors sol. Les éditions du Ctifl, Paris p127.

RESUME

Que ce soit dans un but environnemental ou économique, la réduction des consommations énergétiques en culture de tomate sous serre représente un enjeu majeur. En effet, la demande des consommateurs ne cesse d'augmenter et les serres chauffées sont caractérisées par une forte consommation d'énergie, liée en particulier aux dépenses de chauffage qui représentent entre 10 et 30% des charges d'exploitation. Etant données les augmentations récentes du prix des énergies fossiles, ces dépenses ont fortement affecté le secteur serriste et constitue donc une réalité alarmante qui suscite une réflexion profonde sur son avenir. C'est dans ce contexte que la présente étude a été réalisée dans l'Unité PSH d'INRA d'Avignon et CtiFl Nantes dans le cadre du projet Plantinov'ser qui vise la gestion de chauffage pour la réduction des dépenses énergétique avec une bonne croissance et développement des plants de tomate vigoureux et apte à résister aux aléas climatiques. A cet effet, nous avons testé l'efficacité d'une intégration de température poussée sur le rendement et la qualité des fruits des plants de tomate en valorisant l'énergie solaire du jour, de baisser les consignes de chauffage de nuit, tout en maintenant des températures moyennes optimales sur 24 heures. Les résultats obtenus ont révélés le rôle et l'importance de cette technique dans l'économie d'énergie, l'amélioration de rendement des plants traités sans affecter leur croissance, mais réduit significativement leur qualité en termes de teneurs en sucres et acides.

Mots clés : Tomate, Plantinov'ser, Dépenses énergétique, Intégration de température poussée, Croissance, Rendement, Qualité.

Annexe 1 : Surface cultivée (milliers d'hectares), production et consommation mondiale (millions de tonnes) de tomate pour l'année 2007 (FAO, 2007).

| Pays | Surface cultivée (milliers d'hectares) | Production (millions de tonnes) | Consommation (millions de tonnes) |
|---------------|---|--|--|
| Chine | 1 453, 935 | 33,596881 | 25,265098 |
| USA | 170, 660 | 14,185180 | 10,108874 |
| Inde | 479, 200 | 8,585800 | 6,836430 |
| Turquie | 270, 000 | 9,945043 | 6,112431 |
| Italie | 118, 224 | 6,025613 | 3,796838 |
| Espagne | 54, 100 | 3,664100 | 1,753364 |
| Grèce | 32, 900 | 1,460640 | 1,267878 |
| Maroc | 23, 622 | 1,237030 | 0,740237 |
| France | 4, 235 | 0,708330 | 1,556392 |
| Autres | 2 037, 080 | 50,533799 | 65,351060 |
| Totale | 4 643, 957 | 129,94241 | 122,788602 |

Annexe 2 : Utilisation de sources énergétiques alternatives

Il existe plusieurs sources énergétiques alternatives aux énergies fossiles pour le chauffage des serres :

Chaudières à bois. Cela consiste à utiliser une ressource agricole ou forestière issue de l'entretien de haies et bois, mais également les déchets et chutes de l'industrie du bois (écorces, copeaux, sciure, ...), ou encore les déchets de bois urbains (bois de rebut).

Chaudières à culture énergétique. La combustion des grains et autres parties de végétaux pour produire de l'énergie est une des voies de valorisation des résidus agricoles.

Biogaz. Le biogaz est produit à partir de la fermentation anaérobie de matières organiques animales ou végétales.

Géothermie. La géothermie est basée sur l'utilisation de la chaleur naturelle contenue dans le sous-sol ou dans les aquifères en profondeur qui sont réchauffés au contact des roches.

Solaire thermique. Le principe de fonctionnement du solaire thermique est de chauffer par un rayonnement solaire incident, un fluide caloporteur (eau), utilisé dans un circuit hydraulique ou stocké dans un ballon.

Chacune de ces différentes sources énergétiques alternatives aux énergies fossiles a un coût d'utilisation important, et possède des avantages mais également de nombreux inconvénients et limites (Annexe 2). Il est donc nécessaire de bien définir les besoins des serres, les ressources disponibles à proximité de l'exploitation, les conditions environnementales et socio-économiques de la région, avant d'investir et de développer dans son exploitation l'une ou l'autre de ces énergies. (Grisey et Brajeul, 2007)

| Sources énergétique | Coût d'investissement | Coût de fonctionnement | Coût d'entretien |
|-----------------------|--|---|---------------------------------|
| Bois | <ul style="list-style-type: none">Chaudière à bois sec 100 à 500kW = 520€ HT / kW 1000 à 2500 kW = 150€ HT / kWChaudière à bois humide 100 à 500kW = 690€ HT / kW 1000 à 2500 kW = 210€ HT / kW | <ul style="list-style-type: none">Plaquette forestière sèches : 35 à 91 k€/ha/anPlaquette forestière vertes : 48 à 136 k€/ha/anPlaquette de scierie : 18 à 68 k€/ha/anGranulés de 108 à 195 k€/ha/anEcorces broyées : 11 à 56 k€/ha/anSciure de scierie : 32 à 112 k€/ha/anBroyat de bois de rebut : 20 à 55 k€/ha/an | 2h d'entretien par jour |
| Cultures énergétiques | Type et coût de chaudières identique aux chaudières bois mais avec une puissance 20% moins importante | <ul style="list-style-type: none">Paille en balle : 50 à 70€/t de MS rendue chaufferieGrains de céréales/ granulés culture : 130 à 180 €/t de MS rendue chaufferiePlante entière en balle : 110 à 130 €/t de MS rendue chaufferie | 30 minutes d'entretien par jour |
| Biogaz | 1 millions d'euros pour un besoin thermique de 240kWh/m² et puissance électrique de 250kWé pour la cogénération | Très variable suivant le gisement de substrat (Transport, proximité, surfaces d'épandage | 30 minutes à 1 heure par jour |

| | | | |
|-------------------|---|-----------------------------|---|
| Géothermie | Coût minimum pour 100m ³ /h : <ul style="list-style-type: none"> • Forage : 600€/m • Pompe : 450€/kW • Etude de faisabilité : 20000€ • Autorisation préfectorale : 2000€ • Maîtrise d'œuvre : 3000€ | Energie gratuite | 1 à 2 fois tous les 2 ans (entretien du forage) |
| Rejets thermique | Coût très variable en fonction de l'installation, de la localisation, de l'installation de la chaudière de secondaire, du type de conduite | Energie en général gratuite | Coût variable en fonction de l'installation |
| Solaire thermique | Coût très variable en fonction de la localisation (Nord, Sud), des conditions environnementales et de l'installation | Energie gratuite | |

Avantages et inconvénients de l'utilisation de sources énergétiques alternatives

| Sources énergétique | Avantage | Inconvénient |
|---------------------|--|--|
| Bois | <ul style="list-style-type: none"> • 1m³ = 800 à 1000 kWh = 80 à 100l de fioul domestique • Possibilité de faire de la cogénération | <ul style="list-style-type: none"> • Ressource proche (>50km) • Fiabilité de la ressource dans le temps (qualité et quantité) • Disposer d'une aire de stockage couverte • Besoin d'un chauffage d'appoint pour les périodes les plus froides • Utilisation d'un ballon de stockage d'eau chaude • Pas de récupération de CO₂ sur fumée • Gestion des cendres |
| Culture énergétique | <ul style="list-style-type: none"> • 4500 à 5000 Wh/t MS • Oléagineux → 11000 Wh/t MS • Possibilité de faire de la cogénération • Valorisation de résidus non utilisés | <ul style="list-style-type: none"> • Disposer d'une aire de stockage couverte • Utilisation d'un ballon de stockage d'eau chaude • Pas de récupération de CO₂ sur fumée • Gestion des cendres |
| Biogaz | <ul style="list-style-type: none"> • 6000Wh/Nm³ = 0.6 litre de fioul domestique (pour un biogaz à 60% de méthane) • Valorisation de déchets de culture, déchets agricoles ou encore déchets ménagers • Possibilité de récupération de CO₂ sur fumée | <ul style="list-style-type: none"> • Utilisation d'un ballon de stockage d'eau chaude • Utilisation de cogénération conseillée • 2000t de MS de substrat pour couvrir 60% des besoins d'un hectare par an • Trouver une surface d'épandage proche et suffisante • Utilisation du biogaz au fur et à mesure de sa production, pas de stockage |
| Géothermie | <ul style="list-style-type: none"> • 4°C/100m • Fourniture immédiate d'eau chaude • Energie gratuite et renouvelable | <ul style="list-style-type: none"> • Etre situé dans une localité propice à la géothermie • Demande et autorisation de prélèvement dans la nappe à faire en préfecture • Regroupement entre exploitations pour supporter le coût de l'installation |
| Rejets thermique | <ul style="list-style-type: none"> • Fourniture immédiate d'eau chaude • Energie en général gratuite | <ul style="list-style-type: none"> • Ressource à proximité • Suivre le planning de fonctionnement de l'usine fournissant l'énergie • Avoir une énergie secondaire pour pallier au creux de fourniture d'énergie • Pas de récupération du CO₂ à moins que l'usine en produise |
| Solaire thermique | <ul style="list-style-type: none"> • Fourniture immédiate d'eau chaude • Energie gratuite et renouvelable | <ul style="list-style-type: none"> • Energie fournit par intermittence • Utilisation d'un ballon de stockage d'eau chaude de grande capacité • Besoin d'une énergie secondaire pour des productions gourmande en énergie • Besoin de surface de sol importante |

Annexe 3 : Utilisation d'écran thermique au dessus d'une culture

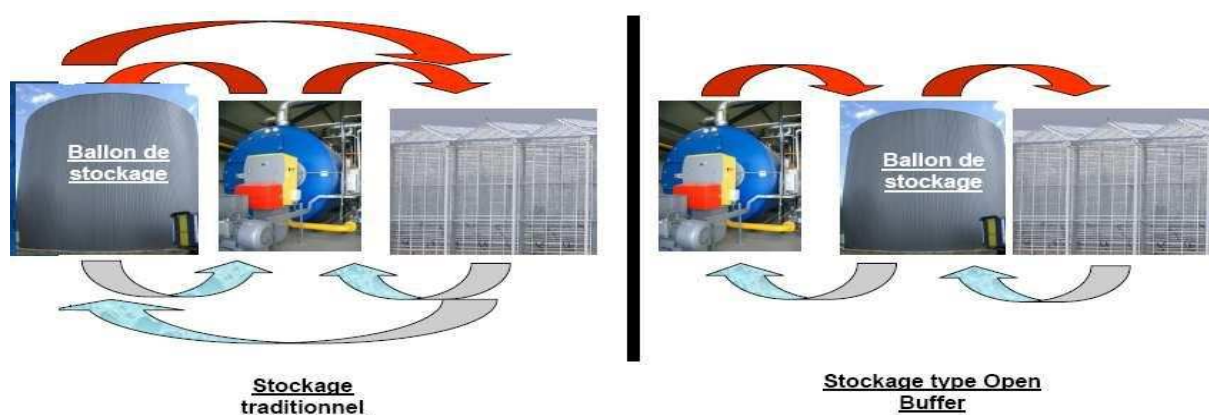
Des expérimentations sur l'utilisation d'écrans thermiques de nuit ont été menées en 2002 et 2003 au Ctifl. Il apparaît qu'il est intéressant de fermer les écrans thermiques la nuit et durant les journées trop froides, entre mi-décembre et fin mai pour éviter les déperditions de chaleur importantes vers l'extérieur. En effet, une zone tampon est alors formée entre l'écran thermique et la toiture en verre de la serre. Cette zone permet d'éviter les pertes de chaleur très importantes, par conduction, convection et rayonnement durant la nuit ou les jours les plus froids de l'hiver. Les expérimentations ont mis en évidence que le fait d'utiliser les écrans thermiques majoritairement de nuit permettait de diminuer la facture énergétique d'environ 30 % sans pénaliser les résultats agronomiques. Cette technique est aujourd'hui mise en place dans la majorité des exploitations de production maraîchère ou horticole.



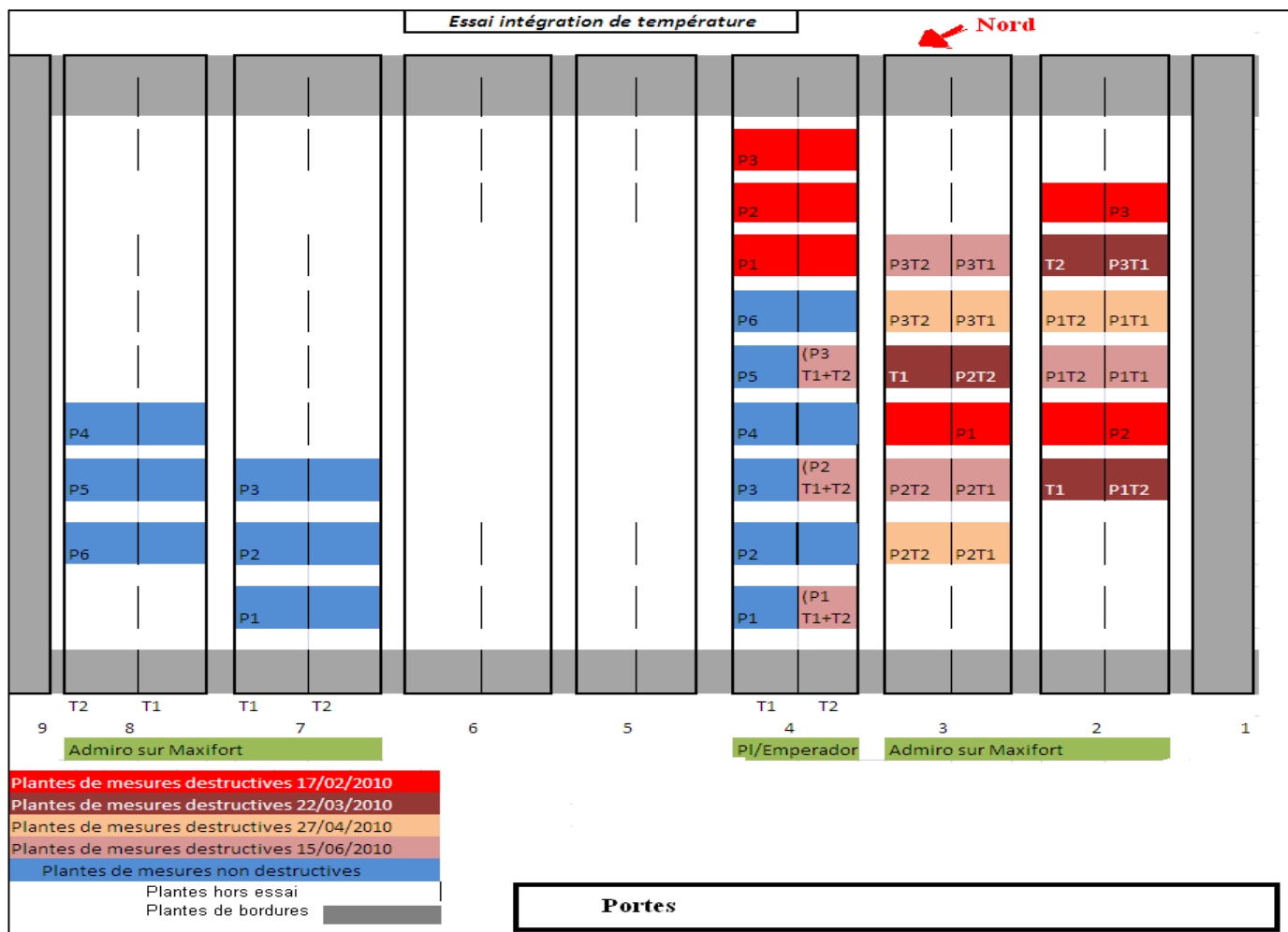
Figure sur le site www.cmf-grupe.com/fr/

Annexe 4 : Comparaison système traditionnel et open buffer (Brajeul E et al., 2008)

Le système fournissant la chaleur peut lui-même être optimisé. Le système, utilisé ici, consiste à stocker la chaleur dans un ballon d'eau. Un principe connu et utilisé depuis fort longtemps, l'évolution principale résidant aujourd'hui dans l'augmentation des volumes de stockage. Les installations traditionnelles fonctionnaient avec le chauffage au centre alimentant d'un côté la serre et de l'autre le ballon d'eau chaude relié à la serre. Les modèles plus récents fonctionnent sur le principe du stockage type Open Buffer avec le ballon de stockage au centre du dispositif. La chaudière ne chauffe que l'eau de la cuve dont la chaleur alimentera la serre. Ce système permet une certaine économie d'énergie en découplant complètement la production de chaleur et sa distribution dans la serre. Ce système permet aussi de maximiser la production de CO₂, réutilisé pour la photosynthèse des plantes, et, grâce à un fonctionnement continu, d'éviter les pics de consommation.



Annexe 5 : Schéma du dispositif expérimental de l'essai intégration de température



Annexe 6 : Préparation des échantillons pour l'analyse des sucres et des acides (lyophilisation et extraction)

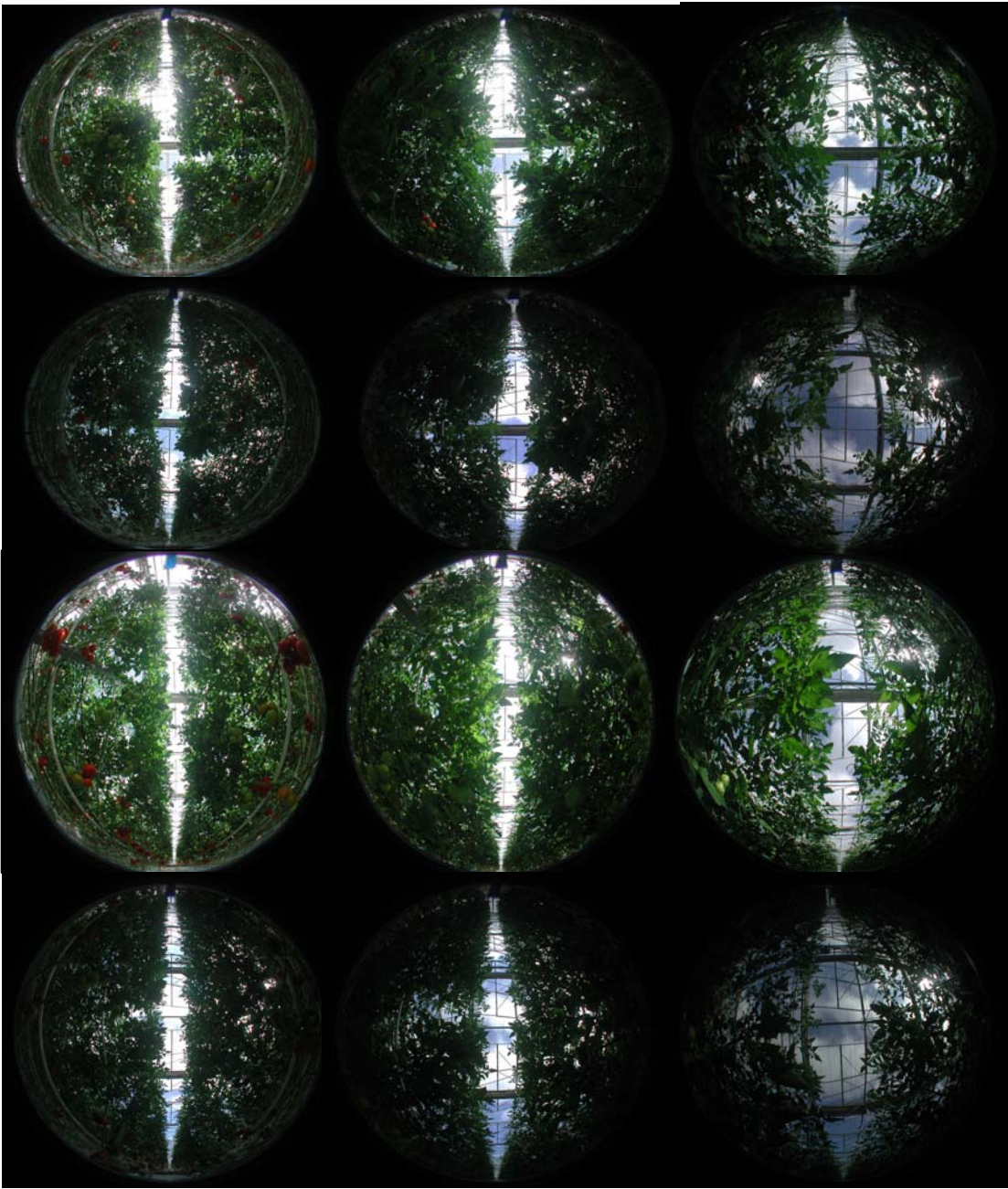
Principe de lyophilisation : La lyophilisation est une technique qui permet la dessiccation sous vide de produits préalablement congelés. L'eau est éliminée par sublimation et l'énergie nécessaire pour ce changement d'état est apportée par convection à l'aide des plateaux chauffants.

Les barquettes congelées sont placées sur les plateaux du lyophilisateur. Le vide est réalisé dans l'enceinte et la montée en température est effectuée avec un programme qui se découpe comme suit : 2h à -20°C, 2h à -5°C, 2h à +5°C, 2h à +15°C et maintien à +25°C jusqu'à l'arrêt du lyophilisateur.

Extraction des sucres et des acides :

Les poudres végétales obtenues après lyophilisation sont mises à l'étuve 1h sous vide à 30°C, puis 10mg sont prélevés dans des microtubes identifiés, auxquels sont ajoutés 1ml de mélange méthanol-eau et 300µl de chloroforme qui permettra de séparer les sucres solubles et sucres insolubles. L'ensemble est mélangé pendant 30min (40rpm +4°C). Une centrifugation est réalisée pendant 15min à +4°C, 13200trs/mn qui permettra d'extraire les sucres solubles et acides organiques. Par la suite, le méthanol est évaporé 3h au SpeedVac dans des cupules contenant 800µl de surnageant. Une purification de l'extrait des sucres solubles et acides organiques est ensuite réalisée par l'ajout de 1600ul d'eau UP (Ultra pur), après agitation pendant 10min, 10mg de PVPP est ajouté, agitation à 4°C pendant 30min, une centrifugation est réalisée pendant 10min, 13200trs/min. le surnageant est ensuite récupéré dans des microtubes de 1,5ml. L'extrait est ensuite mis dans des tubes HPLC à l'aide de la seringue à insuline C-18 combinée au filtre 0,2µm et préalablement conditionnée avec 5ml de méthanol, 15ml d'eau UP, 40ml d'air et 1ml de surnageant. Les sucres solubles et acide organiques des échantillons sont ensuite analysés et dosés par HPLC.

Annexe 7: Photos hémisphériques prises à différentes hauteurs dans le couvert en fonction des génotypes et de la conduite climatique.



| | | |
|------------------|--------|--------|
| Bas de la plante | 130 cm | 210 cm |
|------------------|--------|--------|

| Admiro | | Plaisance | |
|--------|---------------------|-----------|---------------------|
| Témoin | Intégration poussée | Témoin | Intégration poussée |

Annexe 8 : Evolution de la teneur en sucres solubles, Saccharose, Glucose et Fructose pour Admiro et Plaisance en Intégration de température modérée (Témoin) et poussée

A : Avant le traitement. B : Après le traitement

Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil $p < 0,05$.

