



Rapport final

Projet 04-331 Utilisation du tapis chauffant à l'étape des transplants

Rédigé par :
Sébastien Brossard, agr.
Marco Girouard, ing.
Claude Laniel, économiste rural
Gilles Cadotte, agr.

En partenariat avec:



Août 2005

Table des matières

1.	Résumé	6
2.	But de l'essai	7
3.	Matériel et méthodes	7
3.1.	Site.....	7
3.2.	Caractéristiques de la serre	7
3.3.	Protocole.....	7
3.4.	Dispositif expérimental.....	8
3.5.	Conduite de culture.....	9
4.	Résultats et discussions – Aspects agronomiques.....	13
4.1.	Résultats pour le poivron	14
4.2.	Résultats pour la tomate	20
4.3.	Résultats pour le concombre	26
5.	Évaluation des dépenses énergétiques et des économies engendrées par l'utilisation des tapis chauffants	32
5.1.	Objectifs	32
5.2.	Généralités.....	32
5.3.	Méthodologie	32
6.	Résultats et discussions – Aspects énergétiques	36
6.1.	Résultats pour le poivron	37
6.2.	Résultats pour la tomate	42
6.3.	Résultats pour le concombre	46
7.	Observations et recommandations concernant l'utilisation du tapis chauffant électrique.....	50
8.	Conclusion	51

Annexes

- Annexe 1 Annexe des photos
- Annexe 2 Description du modèle de la serre
- Annexe 3 Module chauffant
- Annexe 4 Plan d'aménagement de parcelles
- Annexe 5 Traitement des données pour estimer les coûts énergétiques par plant à partir du modèle mathématique
- Annexe 6 Analyse brute des données énergétiques pour le poivron, la tomate et le concombre
- Annexe 7 Température des substrats

Liste des tableaux

Tableau 3.1	Caractéristiques des tapis chauffants.....	7
Tableau 3.2	Consignes climatiques.....	10
Tableau 3.3	Éclairage artificiel	11
Tableau 3.4	Concentration en ppm des éléments utilisés dans les solutions nutritives durant le stade de transplant des cultures liées au projet.....	12
Tableau 3.5	Caractéristiques de la solution d'irrigation durant la période du projet.....	12
Graphique 4.1	Comparaison du nombre de feuilles par plant de poivron pour les 12 parcelles	14
Graphique 4.2	Comparaison du diamètre de tige au niveau du poivron 12 parcelles.....	15
Graphique 4.3	Comparaison de la hauteur des plants au niveau du poivron 12 parcelles	16
Graphique 4.4	Comparaison de la longueur d'une feuille mature du poivron 12 parcelles	17
Graphique 4.5	Durée du repiquage à la 1 ^{ère} floraison du poivron pour les 12 parcelles	18
Tableau 4.1	Durée de l'étape des semis et transplants chez les plants de poivron.....	19
Graphique 4.6	Comparaison du nombre de feuilles par plant de tomate 12 parcelles	20
Graphique 4.7	Comparaison du diamètre de tige par plant de tomate 12 parcelles.....	21
Graphique 4.8	Comparaison de la hauteur des plants de tomate 12 parcelles	22
Graphique 4.9	Comparaison de la longueur d'une feuille mature d'un plant de tomate 12 parcelles	23
Graphique 4.10	Durée du repiquage à la 1 ^{ère} floraison tomate 12 parcelles.....	24
Tableau 4.2	Durée de l'étape des semis et transplants chez les plants de tomate.....	25
Graphique 4.11	Comparaison du nombre de feuilles par plant de concombre 12 parcelles	26
Graphique 4.12	Comparaison du diamètre de la tige du plant de concombre 12 parcelles.	27
Graphique 4.13	Comparaison de la hauteur des plants de concombre 12 parcelles.....	28
Graphique 4.14	Comparaison de la longueur d'une feuille mature sur plant concombre 12 parcelles	29
Graphique 4.15	Durée du repiquage au stage 5 feuilles concombre 12 parcelles.....	30
Tableau 4.3	Durée de l'étape des semis et transplants chez les plants de concombre.	31
Tableau 5.1	Consommation réelle des différentes sources d'énergie pour février	34
Tableau 5.2	Calcul du ratio d'efficacité énergétique pour février	34
Tableau 6.1	Superficie et temps de culture utilisés après repiquage pour la production d'un plant de poivron	37

Liste des tableaux (suite)

Tableau 6.2	Quantité d'énergie (kWh) requise pour la production d'un plant de poivron au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet.....	39
Graphique 6.1	Quantité d'énergie (kWh) requise pour la production d'un plant de poivron au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet.....	39
Tableau 6.3	Coûts d'énergie requis pour la production d'un plant de poivron au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet.....	41
Tableau 6.4	Superficie et temps de culture utilisés après repiquage pour la production d'un plant de tomate au 13 mars	42
Tableau 6.5	Quantité d'énergie (kWh) requise pour la production d'un plant de tomate au 13 mars selon la méthodologie suivie dans ce projet.....	43
Graphique 6.2	Quantité d'énergie (kWh) requise pour la production d'un plant de tomate au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet.....	44
Tableau 6.6	Coûts d'énergie requis pour la production d'un plant de tomate au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet.....	45
Tableau 6.7	Superficie et temps de culture utilisés après repiquage pour la production d'un plant de concombre au 13 mars	46
Tableau 6.8	Quantité d'énergie (kWh) requise pour la production d'un plant de concombre au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet.....	47
Graphique 6.3	Quantité d'énergie requise pour la production d'un plan de concombre au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet.....	48
Tableau 6.9	Coûts d'énergie requis pour la production d'un plant de concombre au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet.....	49

Remerciements

L'équipe du CIDES désire remercier les entreprises suivantes qui grâce à leur collaboration au niveau technique et financier ont permis de réaliser ce projet :

- **Copal Canada Itée**
Monsieur Michel Dion
65, rue Daoust
Saint-Eustache (Québec)
Téléphone : (450) 473-2330 Télécopieur : (450) 473-6441
Courriel : info@copal.ca Site Web : www.copal.ca
- **Damatex**
9801, boul. Parkway
Ville d'Anjou (Québec) H1J 1P3
Téléphone : (514) 351-3345 Télécopieur : (514) 351-6635
Site Web: www.damatex.ca
- **Hydro-Québec**
Programme IDÉE
Direction de l'Efficacité énergétique, Marketing et Ventes Grandes Entreprises
75, boul. René-Lévesque Ouest
Montréal (Québec) H2S 1A4
- **Laboratoire des technologies de l'énergie (LTE)**
600, avenue de la Montagne
Shawinigan (Québec) G9N 7N5
Téléphone : (819) 539-1417 Télécopieur : (819) 539-1409
Site Web: www.ccfm.ireq.ca
- **Shira Frapa Canada inc.**
Messieurs Robert Prévost et François Wolf
1594, route 201
Ormstown (Québec) J0S 1K0
Téléphone : (450) 829-1177 Télécopieur : (450) 829-1175
Courriel : info@shirafrapa.com Site Web : www.shirafrapa.com
- **Syndicat des producteurs en serre du Québec (SPSQ)**
Maison de l'UPA
555, boul. Roland-Therrien
Longueuil (Québec)
Téléphone : (450) 679-0530
- **Frédéric Lavallée Électronique**
171 rue Bernard
St-Charles-Borromée (Québec) J6E 2C4
Téléphone : (450) 752-0257
Courriel : f.l.e.rd@videotron.ca

1. Résumé

Ce projet consiste à évaluer l'efficacité des tapis chauffants au niveau agronomique, énergétique et économique. L'utilisation de tapis chauffant offre un chauffage de précision. Son fonctionnement permet de chauffer à une température optimum le système racinaire, en plus d'engendrer un micro-climat autour du plant. De façon générale, l'utilisation des tapis chauffants a été bénéfique à tous les niveaux.

Les tapis chauffants ont été utilisés dans le cadre de production de transplants de poivron, de concombre et tomate. Différentes conditions de cultures ont été reproduites pour les groupes témoins sans tapis chauffant et les groupes avec tapis chauffant. Deux régimes de température ambiante et trois régimes d'éclairage ont été expérimentés.

Pour le poivron, l'utilisation du tapis chauffant a accéléré de façon marquée le développement général du plant dans les six traitements. La température ambiante plus élevée et l'ajout d'éclairage artificiel ont également contribué à accélérer le développement du plant. Il faut souligner que la période de culture nécessaire pour produire le transplant a été de 69 jours avec le traitement le moins favorable (température plus basse, sans tapis chauffant et sans éclairage) versus 34 jours avec le traitement optimal (température normale, avec tapis chauffant, éclairage 100 % HPS). Cette réduction de plus de la moitié du temps de culture se reflète directement sur la consommation totale d'énergie (-49 %).

Pour la tomate, l'utilisation du tapis chauffant a surtout permis d'obtenir des plants plus développés lors de la première floraison, et ce, pour les six traitements. À titre d'exemple, le diamètre de la tige était en moyenne de 21 % supérieur pour les plants ayant été sur le tapis chauffant. Sans surprise, la température plus basse a produit également des plants moins développés tandis qu'on a noté un effet positif important de l'éclairage artificiel. Pour ce qui est de la durée de culture pour atteindre la première floraison, le tapis chauffant n'a presque pas eu d'impact tandis que l'éclairage artificiel l'a réduite de façon marquée (environ 30 %).

Pour le concombre, l'utilisation du tapis chauffant a permis d'obtenir des plants plus développés au stade de cinq feuilles matures. Le diamètre de la tige a été en moyenne supérieur de 18 % avec l'utilisation du tapis chauffant. La durée de culture pour atteindre le stade de cinq feuilles matures fut de 28 % inférieure avec les tapis chauffants peu importe la zone de température et avec ou sans éclairage. Cette baisse de la durée de culture permet une économie appréciable du total de l'énergie utilisé d'environ 30 %.

Une durée de culture plus courte permet également de partir les plants plus tard et de produire les plants dans une période moins rigoureuse diminuant ainsi les besoins de chauffage. Il est aussi à noter que pour un même stade de maturité, que le développement racinaire et aérien est plus important avec l'utilisation du tapis chauffant ce qui avantage le plant lors de la transplantation.

Nous croyons que le chauffage des serres au niveau du plancher ou encore directement au niveau racinaire, a un potentiel très intéressant d'un point de vue agronomique et énergétique. Cependant, il faudra évaluer les investissements qu'une entreprise devra effectuer pour profiter pleinement de ce type de chauffage en fonction de son plan d'affaires et de la technologie choisie.

2. But de l'essai

Notre hypothèse d'expérimentation est qu'en abaissant la température ambiante de la serre, on réduit la consommation énergétique. De plus, en maintenant la température du substrat de culture à une température constante et optimale, un microclimat se créera près du feuillage pour offrir un transplant de qualité comparable chez le poivron, le concombre et la tomate. Ainsi, il s'agira de :

- ❑ Déterminer les économies d'énergie engendrées par l'utilisation de tapis chauffant;
- ❑ Vérifier si l'utilisation des tapis chauffants diminue la période de croissance des transplants tout en maintenant la qualité de ces derniers.

3. Matériel et méthodes

3.1. Site

Serre K1 du Centre d'information et de développement expérimental en serriculture (CIDES) à Saint-Hyacinthe.

3.2. Caractéristiques de la serre

Serre de marque Harnois¹ d'une hauteur de 14 pi et d'une superficie de 2 400 pi² (25' x 96') recouverte d'une paroi en double polyéthylène. La serre est chauffée au gaz naturel et l'aération se fait par le toit sur le versant nord-est.

3.3. Protocole

Les essais s'effectuent sur douze parcelles : six sur tapis chauffants et six sur assiettes en styromousse (sans tapis) qui sont aussi réparties de façon uniforme entre la zone froide et la zone normale.

Tableau 3.1 – Caractéristiques des tapis chauffants

Modèle	Description	Dimension	Puissance		
			Nominale W	Mesurée W	Par superficie W/pi ²
Copal	Serpentin électrique incrusté dans de la fibre de béton	1' X 8' (épaisseur ≈ ½")	100	93	11.7

Le lecteur trouvera à l'annexe 3, la fiche descriptive du tapis chauffant.

¹ Description du modèle de la serre en annexe 2

3.4. Dispositif expérimental ²

La superficie totale d'expérimentation de la serre est de 2250 pi² (25' X 90'). Cet espace est séparé en deux surfaces égales au milieu de la serre pour obtenir deux zones de consigne de température différentes : la zone A – consigne de température froide et la zone B – consigne de température normale. Chaque section contient cinq tables ayant chacune une superficie de 160 pi (4X40). Sur chaque table il y a neuf tapis chauffants de 8 pi² chacun, c'est-à-dire 72 pi² par table; il y a donc 720 pi² de tapis chauffant dans le dispositif expérimental. Les tables occupent donc 71.1 % de la superficie d'expérimentation ou 66.7 % de la superficie de la serre.

Chacune de ces zones de température est séparée par un polythène transparent³ Poly K-50 clair. Celui-ci part du sol pour rejoindre directement l'écran thermique. Des polyéthylènes blancs lustrés et opaques⁴ séparent les différentes parcelles à l'intérieur d'une même zone de température. Ceux-ci partent d'environ deux pieds en dessous des écrans thermiques pour rejoindre le dessus des tables⁵. Un polyéthylène transparent bloquant 70 % de la lumière est utilisé à l'intérieur de la serre sur les côtés et à six pieds de l'extrémité nord de la serre. Ce dernier part du sol pour rejoindre directement l'écran thermique.

Chaque zone de température est divisée en trois zones d'éclairage distinctes : zone sans éclairage artificiel⁶ située aux extrémités de la serre, zone d'éclairage artificiel combiné HPS+LED et éclairage 100 % HPS au milieu de la serre. Chaque zone d'éclairage, à l'exception de la zone située entre les deux zones d'éclairage HPS, est séparée par des polyéthylènes blancs lustrés et opaques afin de bloquer tous les rayons lumineux de l'éclairage artificiel pouvant affecter la croissance des plants situés dans les zones voisines. Chaque zone d'éclairage est composée de cinq portions de tables sur lesquelles des sections avec et sans tapis chauffant ont été aménagées. Ces données de culture ont été prélevées seulement à partir des trois tables du milieu. Voir le plan d'aménagement en annexe 4.

Une zone tampon d'un pied sépare chaque zone d'éclairage et une autre zone tampon de deux pieds sépare les deux zones de température.

Pour chaque traitement, nous avons recueilli les données de trois plants. Chaque parcelle était donc constituée de trois plants évalués.

² Voir le plan d'aménagement des parcelles du projet à l'annexe 4.

³ Voir annexe 1 photo no 1.

⁴ Polyéthylène couvre-sol Rhino 5 mil

⁵ Cette espace était allouée pour permettre une meilleure circulation et homogénéisation de l'air en dessous des tables et en dessous des écrans thermiques pour une même zone de température

⁶ Éclairage naturel

Les 12 parcelles expérimentales sont réparties comme suit :

Section de consigne de température normale (section B) :

- Parcelle 1 : Sans tapis chauffant et sans éclairage artificiel
- Parcelle 2 : Avec tapis chauffant et sans éclairage artificiel
- Parcelle 3 : Sans tapis chauffant et avec éclairage artificiel combiné
- Parcelle 4 : Avec tapis chauffant et avec éclairage artificiel combiné
- Parcelle 5 : Sans tapis chauffant et avec éclairage artificiel 100 % HPS
- Parcelle 6 : Avec tapis chauffant et avec éclairage artificiel 100 % HPS

Section de consigne de température froide (section A) :

- Parcelle 7 : Sans tapis chauffant et sans éclairage artificiel
- Parcelle 8 : Avec tapis chauffant et sans éclairage artificiel
- Parcelle 9 : Sans tapis chauffant et avec éclairage artificiel combiné
- Parcelle 10 : Avec tapis chauffant et avec éclairage artificiel combiné
- Parcelle 11 : Sans tapis chauffant et avec éclairage artificiel 100 % HPS
- Parcelle 12 : Avec tapis chauffant et avec éclairage artificiel 100 % HPS

3.5. Conduite de culture

3.5.1. Calendrier des cultures

Poivrons :

- o Semis : 12/12/2004
- o Repiquage : 3/01/2005 (jour 22)
- o Première floraison – fin étape transplants
- o Date de sortie : 15/03/2005 (jour 93)

Concombres :

- o Semis : 14/01/2005
- o Repiquage : 27/01/2005 (jour 13)
- o Fin étape de transplant (stage 4 -5 feuilles)
- o Date de sortie : 22/02/2005 (jour 39)

Tomates :

- o Semis : 31/12/2004
- o Repiquage : 13/01/2005 (jour 13)
- o Première floraison – fin période transplant
- o Date de sortie : 23/02/2005 (jour 54)

3.5.2. Variétés

ZAMBONI pour le poivron

TRUST pour la tomate

LANGLEY pour le concombre

3.5.3. Conduite de culture des plants

Le repiquage se fait en cubes de laine de roche de marque Grodan et la dimension de chaque cube est 10 cm X 10 cm X 6,5 cm. L'écran thermique bloque 40 % des rayons lumineux, est fixe et fermé durant tout le projet. Les murs de la serre sont munis d'une couverture en plastique blanc bloquant 70 % des rayons lumineux du soleil. Le tout est pour reproduire les conditions de lumière de la période de mi-décembre au début janvier.

3.5.4. Consignes climatiques

Tableau 3.2 – Consignes de températures de l'air ambiant pour la période du 3 janvier au 15 mars 2005

Zones		Consigne de jour	Consigne de nuit	Moyenne (24 heures)
		°C	°C	°C
« A » Froide	Consigne	20	18	19.40
	Obtenue	-----	-----	21.72
« B » Normale	Consigne	23	21	22.40
	Obtenue	-----	-----	22.67

- Consigne de jour : 8h00 par jour
- Consigne de nuit : 16h00 par jour
- Différence moyenne sur 24 heures = 0.95 °C
- Aération : 3 °C au dessus de la consigne de température normale.

3.5.5. Consignes de température du substrat pour les tapis chauffants et moyennes obtenues

22 °C pour le poivron.

22 °C pour la tomate.

22 °C pour le concombre.

Nous avons obtenu 22,4 centigrades comme température moyenne durant la période du 17 janvier au 14 mars 2005 tel que mesuré avec 2 sondes à toutes les 2 minutes. Les 2 sondes étaient situées dans les parcelles 6 et 12.

Cependant, les mesures faites dans chaque parcelle le 2 février nous démontrent que la température du substrat variait pour chacun des traitements. À cet effet vous pouvez consulter l'annexe 7 et prendre connaissance des remarques sur les tableaux 1 et 2 qui s'y trouvent.

3.5.6. Éclairage artificiel

Tableau 3.3 – Caractéristiques des systèmes d'éclairage artificiel

Type	Description	Puissance de la lampe W	Nombre ⁷	Superficie ⁸ totale couverte m ²	Puissance brute d'éclairage par superficie couverte W/m ²
100 % HPS	Lampes haute pression sodium de Son-T-Agro de Phillips Ballast	600	3	60.4	29.8 (de serre)
		75	3		
Combiné HPS et LED ⁹	Lampes haute pression sodium de Son-T-Agro de Phillips Ballast	600	2	60.4	19.9 (de serre)
		75	2		
	Diode rouge d'OptiLed Ballast	1	280	44.6	6.3 (de table)
		1.5	280		

3.5.7. Régie de l'éclairage artificiel

Pour les deux types d'éclairage : Photopériode de 16h/jour commençant à minuit et se terminant à 16h00.

3.5.8. Enrichissement de l'air ambiant en CO₂

Source de CO₂ liquide, à un taux de 400 ppm durant les journées grises et de 700 ppm durant les journées ensoleillées.

Nous utilisons une source de CO₂ pure (liquide) étant donné que les plantules sont extrêmement sensibles aux sous-produits d'une mauvaise combustion de produits pétroliers.

3.5.9. Humidité

Chaque zone de température est équipée d'un générateur de brouillard MDFD-6 de marque SHIRA FRAPA¹⁰. La capacité d'un générateur est de 3 litres d'eau par heure en gouttelettes d'eau inférieures à 5 microns. La consigne s'établit à 70 % HR le jour et à 60 % HR la nuit et le tout est contrôlé par l'humidostat de l'appareil.

⁷ Pour les deux zones de température

⁸ Pour les deux zones de température

⁹ Les lampes ont été également allumées pendant 16 heures par jour sauf lors de 6 incidents qui ont eu pour effet de réduire le nombre d'heures d'éclairage « Led » cumulé de 48 heures.

¹⁰ Pour plus d'information sur les caractéristiques techniques du générateur de brouillard MDFD-6, aller au lien : <http://www.shirafropa.com/french/product.html> . Également, voir la photo 16 dans l'annexe 1.

3.5.10. Régie d'arrosage

L'arrosage se fait quotidiennement et manuellement deux fois par jour, l'un à 10h30 et l'autre à 12h30. Le degré d'arrosage se fait en fonction des besoins de consommation d'eau de la plante.

L'utilisation d'un robinet mélangeur (mixing valve) a permis de régulariser la température moyenne de la solution d'irrigation à 20 °C.

3.5.11. Composition hydrominérale

La composition hydrominérale de la solution d'irrigation est établie en fonction des besoins des cultures selon leurs stades de développement.

Tableau 3.4 - Concentration en ppm des éléments utilisés dans les solutions nutritives durant le stade de transplant

Éléments	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Mo
ppm	150	50	150	150	30	57	3	0,05	1,5	0,3	0,5	0,05

Comme concentration de la conductivité électrique (CE) et du pH de la solution d'irrigation, nous nous sommes fixés les normes selon le tableau suivant.

Tableau 3.5 - Caractéristiques de la solution d'irrigation

Stade des cultures	CE	pH
Semis à la levée	0,5 - 1,0	5,8
Après la levée au repiquage	1,5 - 2,0	5,8
Après le repiquage	2,0 - 2,5	5,8
Tomates et poivrons matures	2,5 - 3,0	5,8

3.5.12. Phytoprotection

Le dépistage hebdomadaire a été fait d'une part avec des pièges jaunes collants pour signaler la présence d'insectes et acariens nuisibles. D'autre part, une inspection visuelle des plants a été effectuée. Aucune présence de ravageur n'a été signalée.

4. Résultats et discussions - Aspects agronomiques

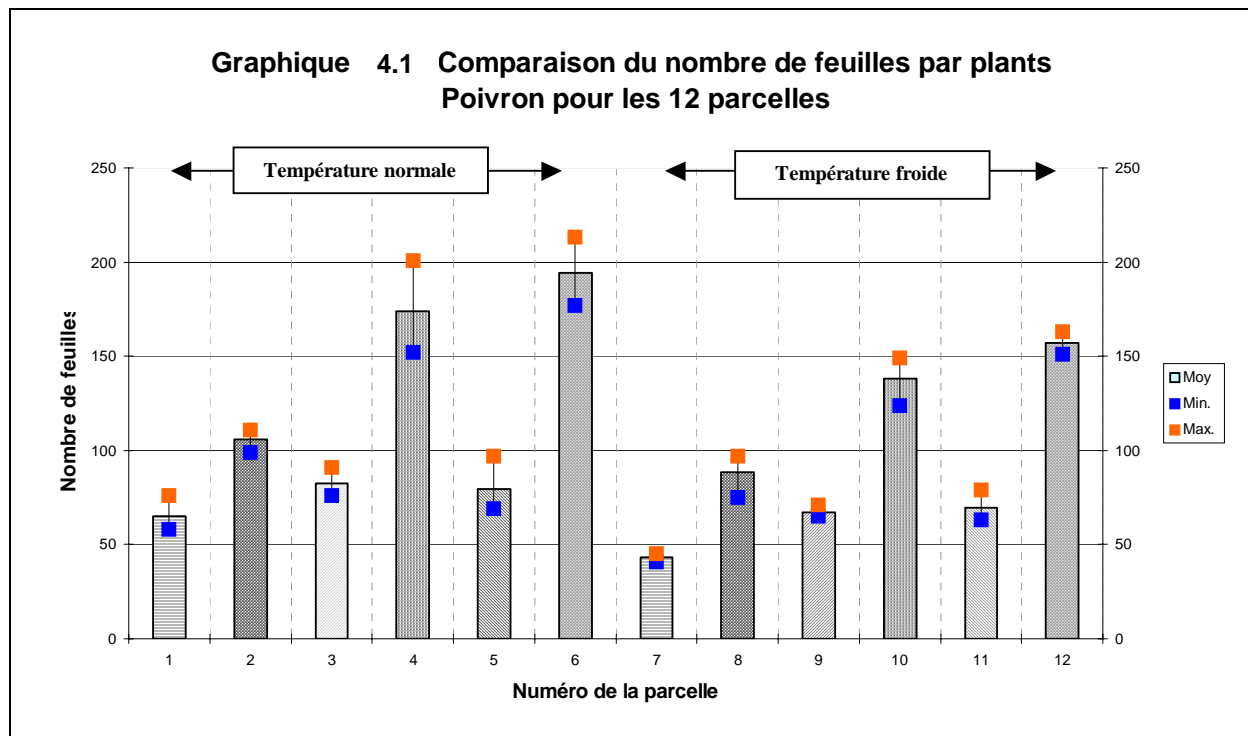
Les éléments mesurés pour une même période de culture (mesurage le 14 mars 2005) ont été :

- le nombre de feuilles produites pour une même période
- le diamètre de la tige
- la hauteur du plant
- la grandeur d'une feuille mature
- la durée de culture requise pour atteindre un même stade de maturité

Les graphiques, les tableaux des résultats et les photos laissent peu de doutes quant à l'effet des tapis chauffants sur le développement des plants, ainsi que de l'effet du régime de température ambiante et de l'utilisation de l'éclairage artificiel.

4.1. Résultats pour le poivron

4.1.1. Nombre de feuilles



* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

L'utilisation du tapis chauffant joue un grand rôle sur la croissance de la masse foliaire plus spécifiquement, au niveau du nombre de feuilles¹¹. Les plants de poivrons situés sur tapis chauffants ont bénéficié d'un système racinaire mieux développé et probablement d'un micro-climat produit par la chaleur aérienne dégagée par le tapis chauffant¹².

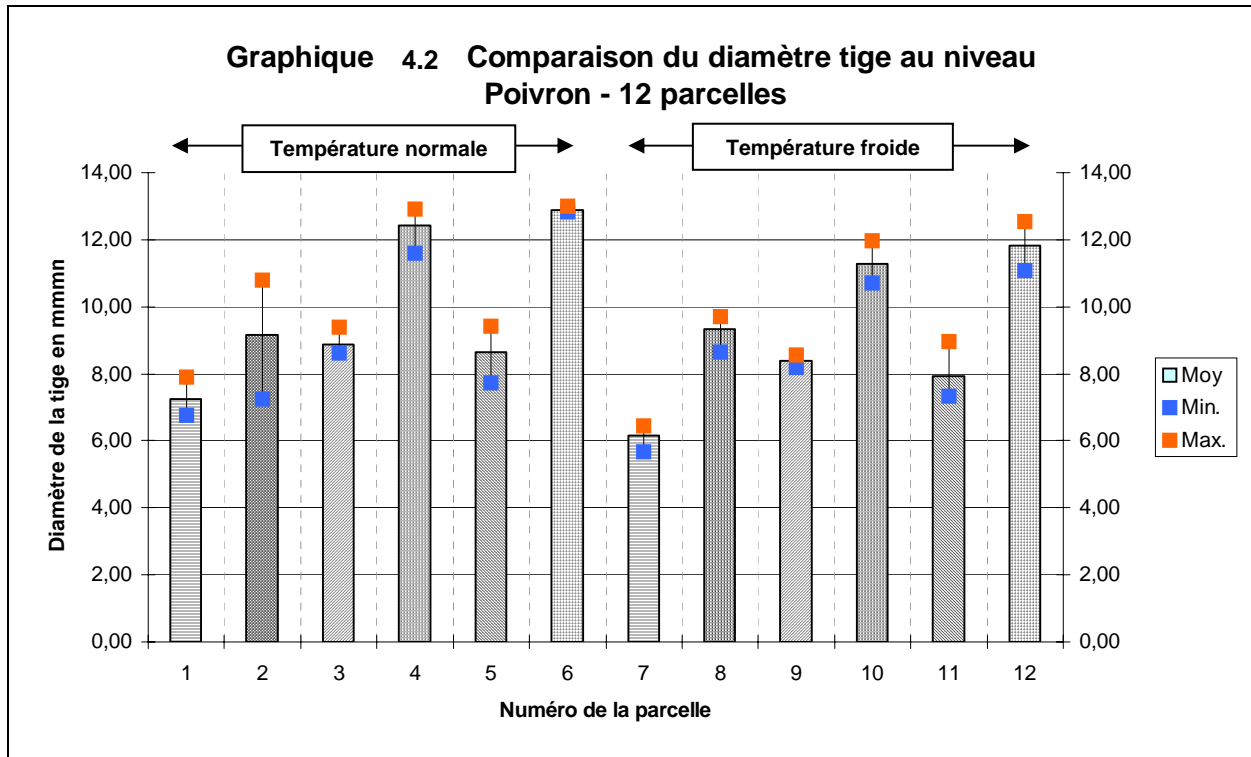
La couleur du feuillage démontre que les plants de poivrons situés sur tapis chauffants ont bénéficié d'une assimilation plus efficace des éléments minéraux fournis par la solution d'irrigation lors des arrosages. La couleur du feuillage des plants sur tapis était d'un vert plus foncé et équilibré que les plants situés sur assiettes de styromousse.

Comme note intéressante, nous observons que les plants situés sur tapis chauffant en zone de température froide obtiennent des résultats supérieurs que les plants situés en zone de température normale sans tapis chauffant.

¹¹ Voir photo 3 dans l'annexe 1.

¹² Voir photos 4, 5, 6 et 7 dans l'annexe 1.

4.1.2. Diamètre de la tige

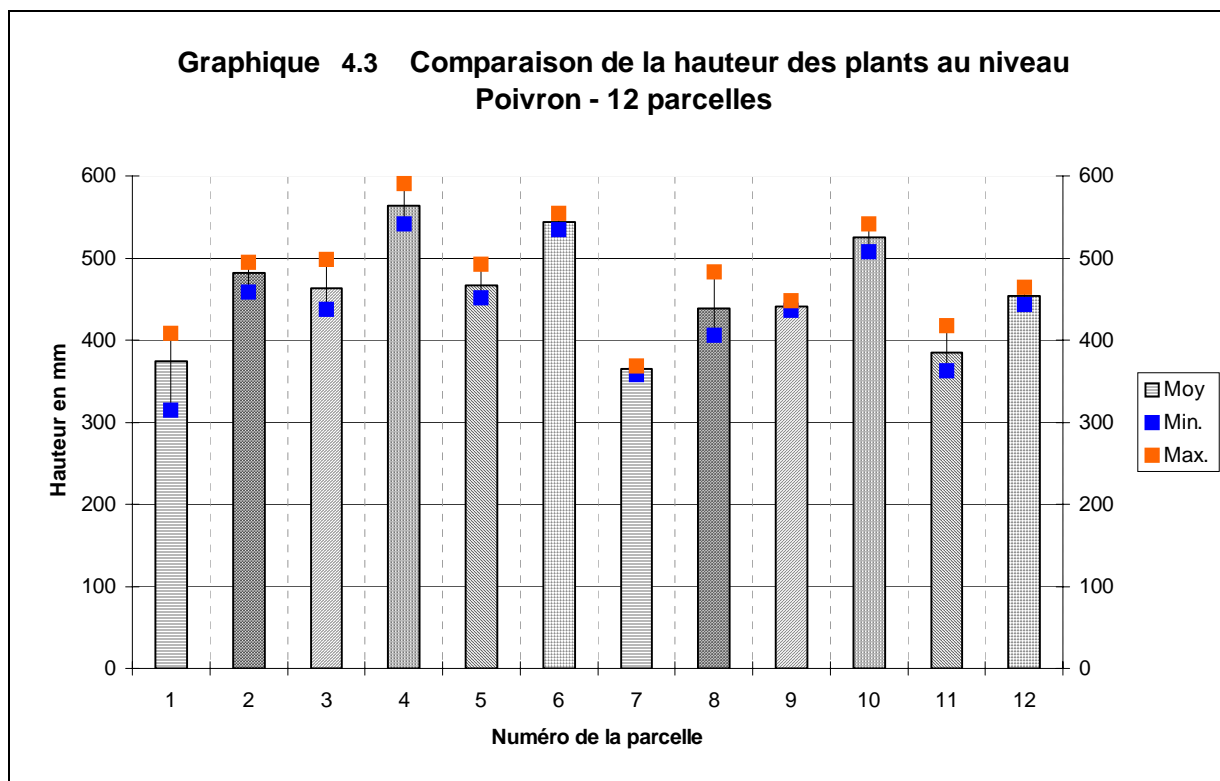


* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

L'effet du tapis chauffant se fait sentir sur le diamètre de la tige des plants. Les plants situés sur tapis chauffant ont de plus gros diamètres (+ 42 %) que leurs homologues situés sans tapis chauffant. L'effet de la température ambiante (0.95 °C) a eu une légère influence sur le diamètre des tiges (+ 7.9 %).

Comme autre observation très intéressante, le diamètre des tiges des plants situés sur tapis chauffant en zone de température froide est de beaucoup supérieur (+ 29 %) que celui des plants situés en zone de température normale sans tapis chauffant. Notons tout de même que les meilleurs résultats se trouvent au niveau des plants situés sur tapis chauffants dans la zone de température normale. Il ne faut pas oublier que 42 % de plus en diamètre de tige signifie en réalité une aire de tige supérieure de 102 % donc autant de capacité de circulation pour la sève du futur plant.

4.1.3. Hauteur du plant



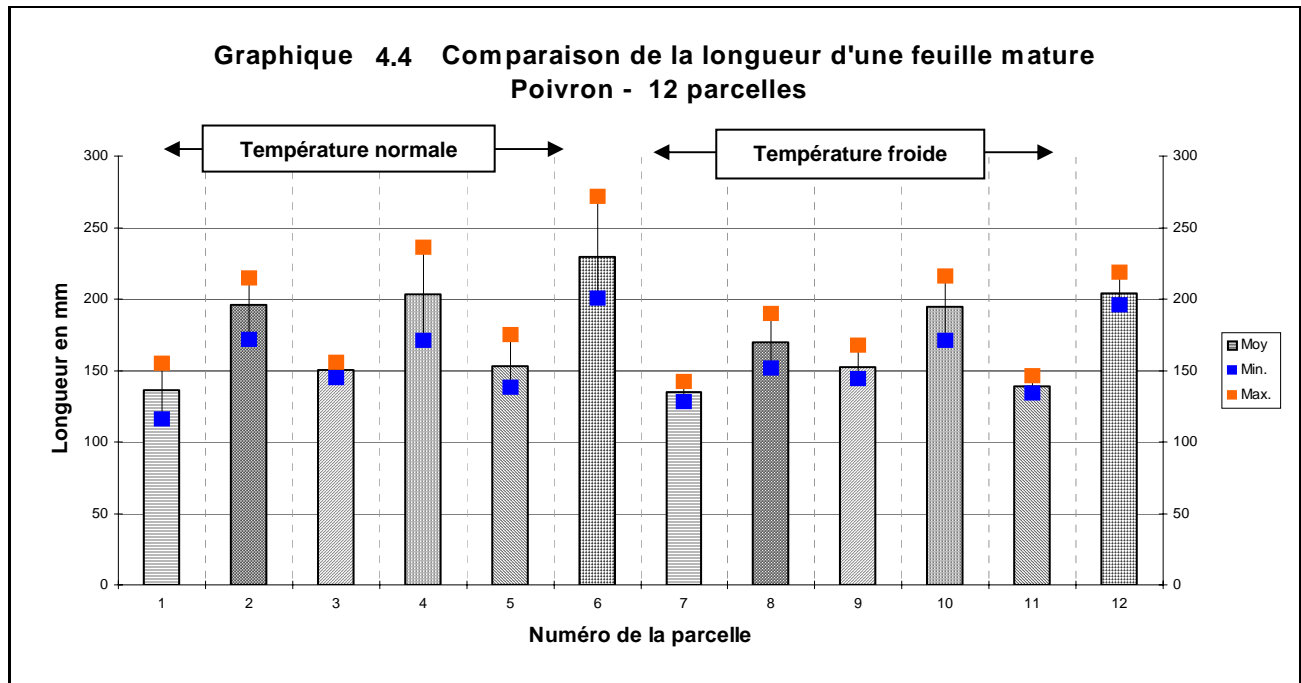
* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

Nous notons que la hauteur des plants est influencée positivement par l'utilisation du tapis chauffant¹³, et ce peu importe la consigne de température¹⁴. Par contre, nous constatons que la température en dessous de la consigne de température normale a une incidence négative sur la hauteur des plants.

¹³ Voir photo 8 dans l'annexe 1.

¹⁴ Voir photo 9 dans l'annexe 1.

4.1.4. Longueur d'une feuille mature



* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

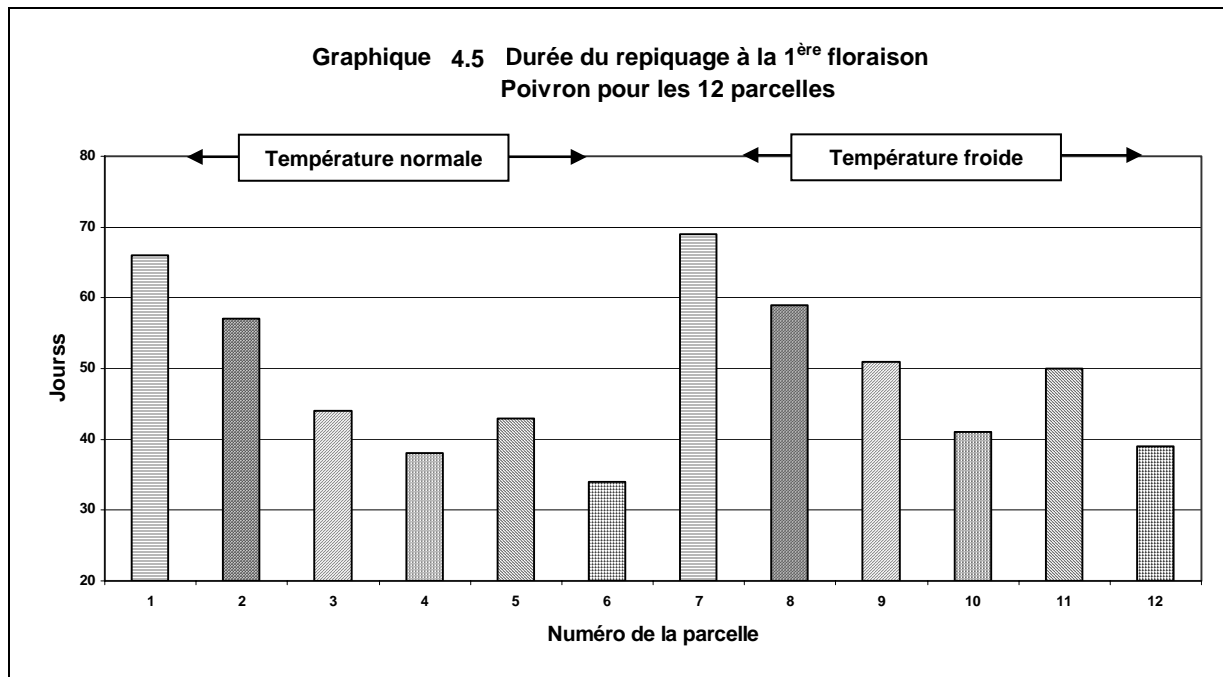
Dans le cas de la longueur d'une feuille mature, l'effet du tapis chauffant se fait remarquer de façon positive. Les meilleurs résultats ont été observés dans la parcelle 6; tapis chauffant avec éclairage 100 % HPS dans la zone de température normale.

En général pour les caractéristiques agronomiques, nous remarquons que les plants situés sur tapis chauffants obtiennent de meilleurs rendements que ceux des plants élevés sans tapis. Une autre remarque importante à mentionner est que les plants sur tapis chauffants situés en zone froide obtiennent des rendements supérieurs en tout point à leurs homologues situés en zone de température normale sans tapis chauffant.

4.1.5. Durée de culture

La première floraison a été utilisée pour établir un même seuil de maturité dans les divers traitements (voir le tableau 4.1, colonne « Date fin »)

En moyenne, nous avons atteint une maturité plus précoce sur les tapis. Voici notre constat pour le gain en temps en fonction des parcelles expérimentales.



* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

Tableau 4.1 - Durée de l'étape des semis et transplant chez les plants de poivrons

#	Zone	Utilisation tapis	Date semis	Repiquage	Date fin	Durée totale		Durée repiquage-fin	
						Jour	Semaine	Jour	Semaine
1	Chaude		12-déc-04	03-janv-05	10-mars-05	88	12,6	66	9,4
2	Pas d'éclairage	X	12-déc-04	03-janv-05	01-mars-05	79	11,3	57	8,1
3	Chaude		12-déc-04	03-janv-05	16-févr-05	66	9,4	44	6,3
4	éclairage 2*	X	12-déc-04	03-janv-05	10-févr-05	60	8,6	38	5,4
5	Chaude		12-déc-04	03-janv-05	15-févr-05	65	9,3	43	6,1
6	100% HPS	X	12-déc-04	03-janv-05	6-févr-05	56	8,0	34	4,9
7	Froide		12-déc-04	03-janv-05	13-mars-05	91	13,0	69	9,9
8	Pas d'éclairage	X	12-déc-04	03-janv-05	3-mars-05	81	11,6	59	8,4
9	Froide		12-déc-04	03-janv-05	23-févr-05	73	10,4	51	7,3
10	Éclairage 2*	X	12-déc-04	03-janv-05	13-févr-05	63	9,0	41	5,9
11	Froide		12-déc-04	03-janv-05	22-févr-05	72	10,3	50	7,1
12	100% HPS	X	12-déc-04	03-janv-05	11-févr-05	61	8,7	39	5,6

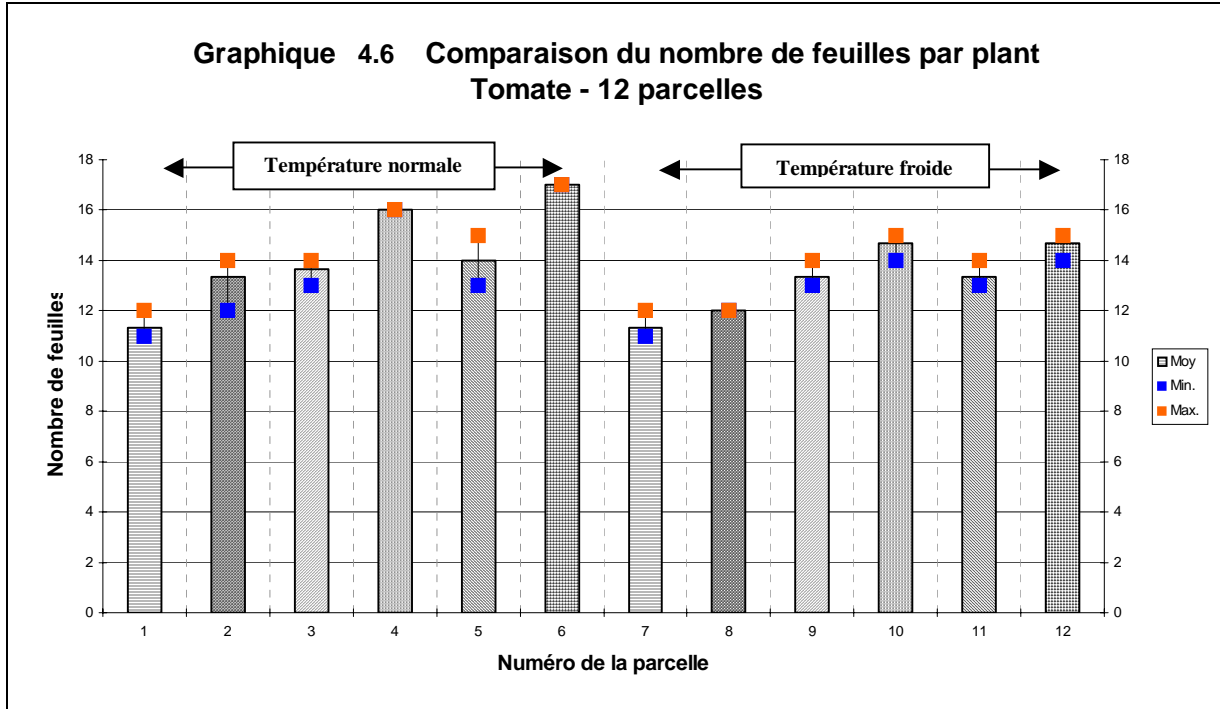
*Éclairage combiné avec HPS et Led

Dans les zones ne bénéficiant pas de tapis chauffant, nous avons observé un délai de plusieurs jours pour tous les traitements.

Une autre différence significative réside dans le fait que les plants de poivrons situés sur tapis ont un développement racinaire avancé leur permettant de s'implanter efficacement dans le pain de substrat pour l'étape suivante. Quant aux plants de poivrons n'étant pas situés sur tapis, leur développement racinaire est nettement inférieur et nous doutons de leur efficacité à bien s'implanter dans le pain de substrat.

4.2. Résultats pour la tomate

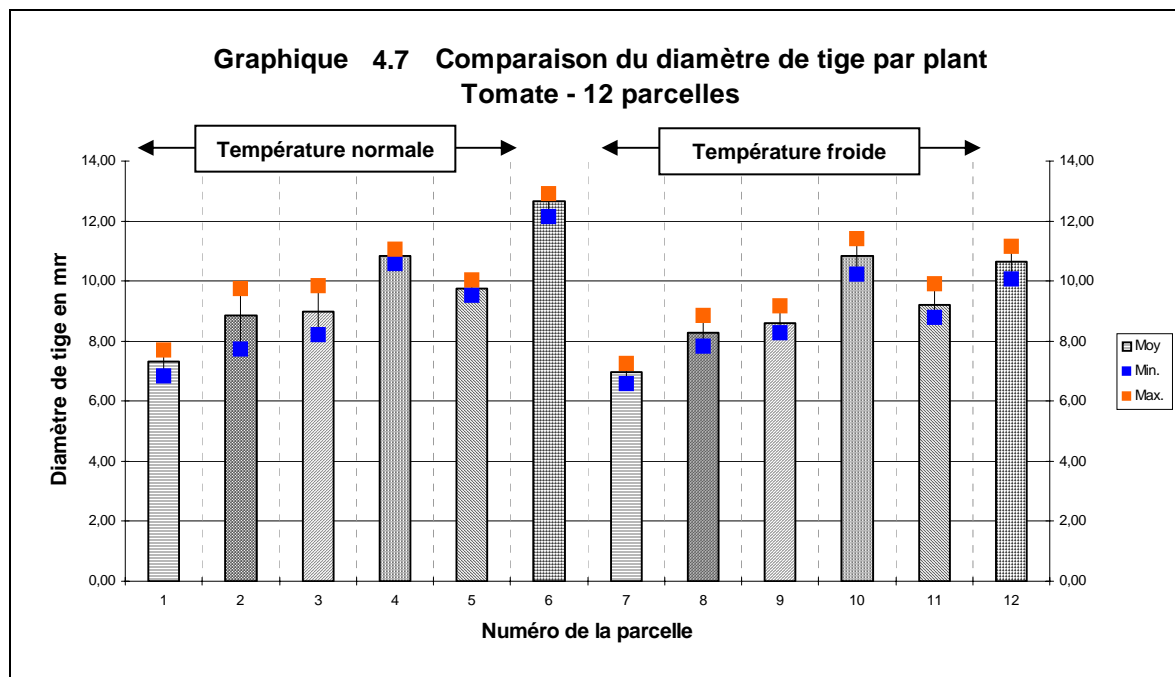
4.2.1. Nombre de feuilles



* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

D'après les résultats, nous notons une augmentation légère du nombre de feuilles des plants de tomate due à l'utilisation du tapis chauffant. Comme observation, nous notons que le tapis chauffant favorise le côté végétatif par rapport au côté reproductif. Les plants de tomates sur tapis chauffants en zone de température froide obtiennent plus de feuilles que leurs homologues situés dans la zone de température normale sans tapis chauffant.

4.2.2. Diamètre de la tige

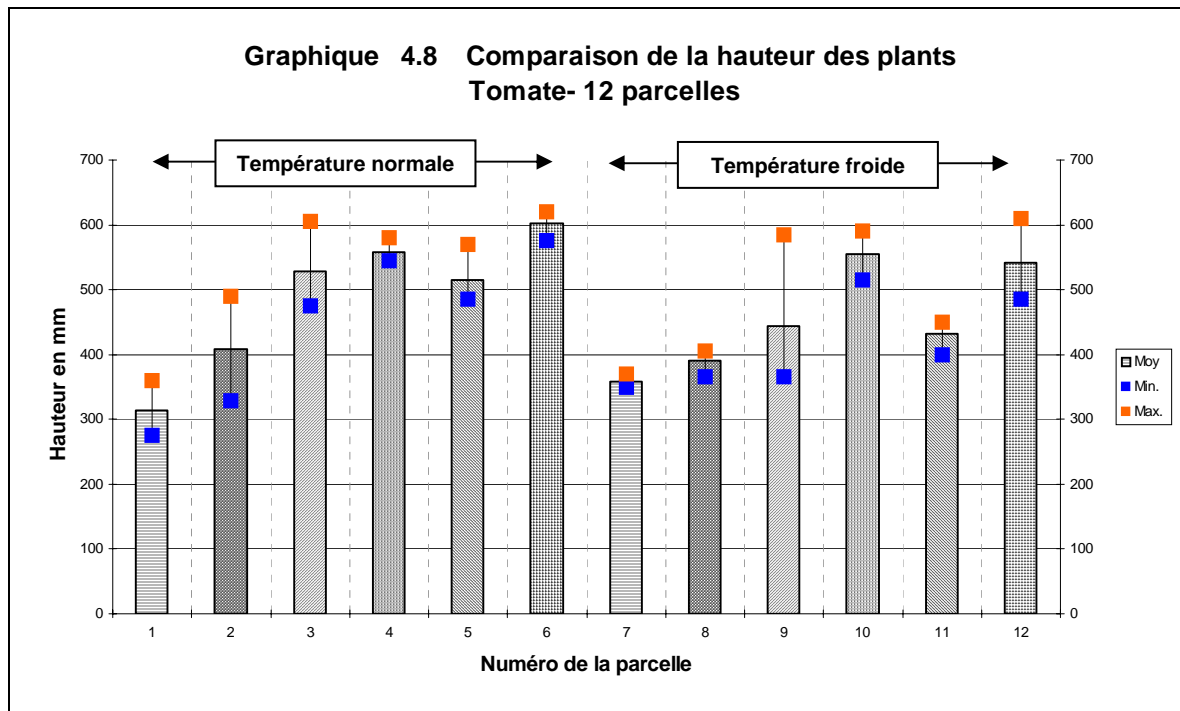


* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

L'effet du tapis chauffant se fait sentir sur le diamètre de la tige des plants. Les plants situés sur tapis chauffant ont de plus gros diamètres (+ 20 %) que leurs homologues sans tapis chauffant. Nous constatons que l'effet de la température ambiante a eu ici moins d'influence sur le diamètre des tiges sauf pour le traitement avec éclairage HPS. Il ne faut pas oublier que 20 % de plus en diamètre de tige signifie en réalité une aire de tige supérieure de 44 % donc autant de capacité de circulation pour la sève du futur plant.

Comme autre observation très intéressante, le diamètre des tiges des plants situés sur tapis chauffant avec éclairage en zone de température froide est supérieur à celui des plants situés en zone de température normale sans tapis chauffant.

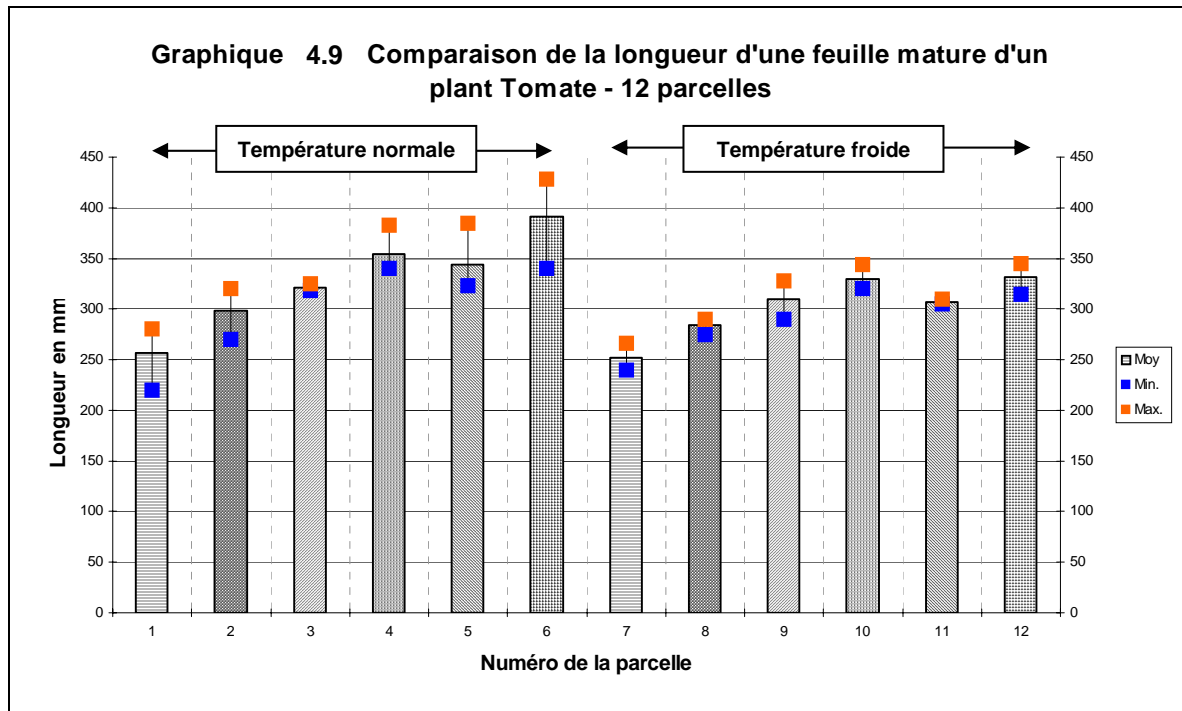
4.2.3. Hauteur du plant



* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

La hauteur des plants est accentuée par l'utilisation du tapis chauffant. Comme observation, nous notons que le tapis chauffant favorise le côté végétatif par rapport au côté reproductif. Les plants de tomates ayant une plus grande hauteur se trouvent sur tapis chauffants dans la zone de température normale.

4.2.4. Longueur d'une feuille mature

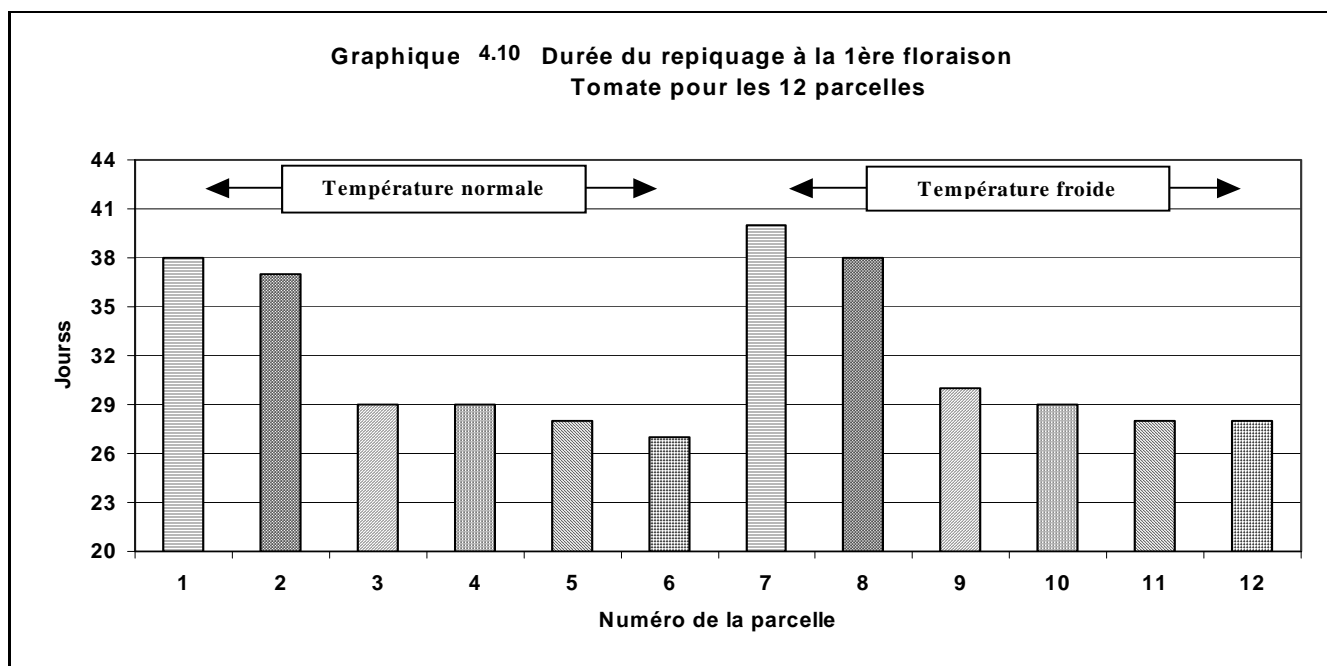


* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffant.

Nous notons une légère augmentation de la longueur de la feuille chez les plants situés sur tapis chauffant.

4.2.5. Durée de culture

La première floraison a été utilisée pour établir un même seuil de maturité dans les divers traitements (voir le tableau 4.2, colonne « Date fin »). Bien que le gain en temps sur la durée de l'étape des transplants soit peu important (1 jour de gain dans 4 des 6 comparaisons), nous avons obtenu en moyenne une maturité plus avancée sur les tapis. Voici notre constat en fonction des parcelles expérimentales.



* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

Tableau 4.2 - Durée de l'étape des semis et transplants chez les plants de tomates.

#	Zone	Utilisation tapis	Date semis	Repiquage	Date fin	Durée semis-fin		Durée repiquage-fin	
						Jour	Semaine	Jour	Semaine
1	Chaude		31-déc-04	13-janv-05	20-févr-05	51	7,3	38	5,4
2	Pas d'éclairage	X	31-déc-04	13-janv-05	19-févr-05	50	7,1	37	5,3
3	Chaude		31-déc-04	13-janv-05	11-févr-05	42	6,0	29	4,1
4	Éclairage 2*	X	31-déc-04	13-janv-05	11-févr-05	42	6,0	29	4,1
5	Chaude		31-déc-04	13-janv-05	10-févr-05	41	5,9	28	4,0
6	100% HPS	X	31-déc-04	13-janv-05	9-févr-05	40	5,7	27	3,9
7	Froide		31-déc-04	13-janv-05	22-févr-05	53	7,6	40	5,7
8	Pas d'éclairage	X	31-déc-04	13-janv-05	20-févr-05	51	7,3	38	5,4
9	Froide		31-déc-04	13-janv-05	12-févr-05	43	6,1	30	4,3
10	Éclairage 2*	X	31-déc-04	13-janv-05	11-févr-05	42	6,0	29	4,1
11	Froide		31-déc-04	13-janv-05	10-févr-05	41	5,9	28	4,0
12	100 % HPS	X	31-déc-04	13-janv-05	10-févr-05	41	5,9	28	4,0

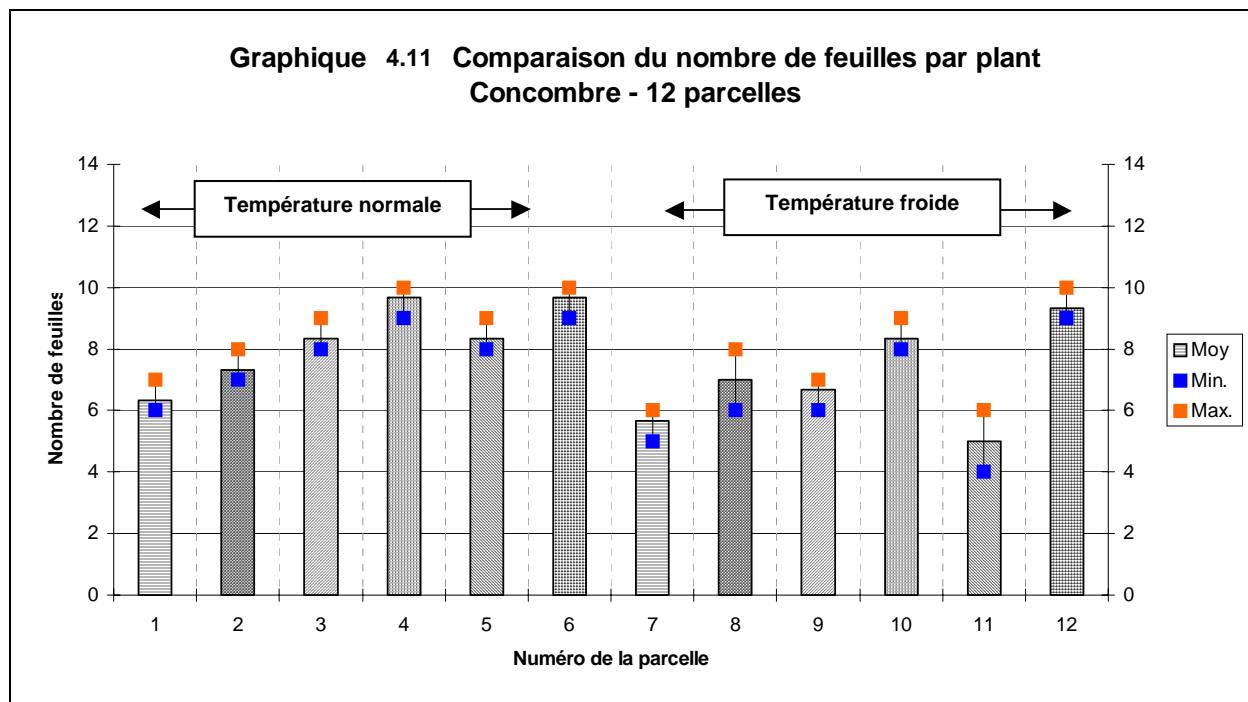
*Éclairage combiné avec HPS et Led

Pour les plants de tomates n'étant pas sur tapis chauffants, nous retrouvons une qualité racinaire presque comparable à celle des plants situés sur tapis chauffants. La principale différence notée se situe au niveau de la croissance végétative du plant; les plants de tomates situés sur tapis chauffant ont une croissance végétative plus accentuée que ceux n'étant pas sur tapis chauffant.

En résumé, l'utilisation du tapis chauffant amène des gains agronomiques pour les plants de tomates. Par contre, les gains agronomiques ne sont pas aussi importants que ceux trouvés chez le poivron et le gain en temps sur la durée de l'étape des transplants est relativement faible; ceci pourrait s'expliquer par le fait que les transplants ont été produits dans des régimes de températures assez élevées pour la tomate (moyenne : zone froide de 21.72 °C et zone normale de 22.67 °C).

4.3. Concombre

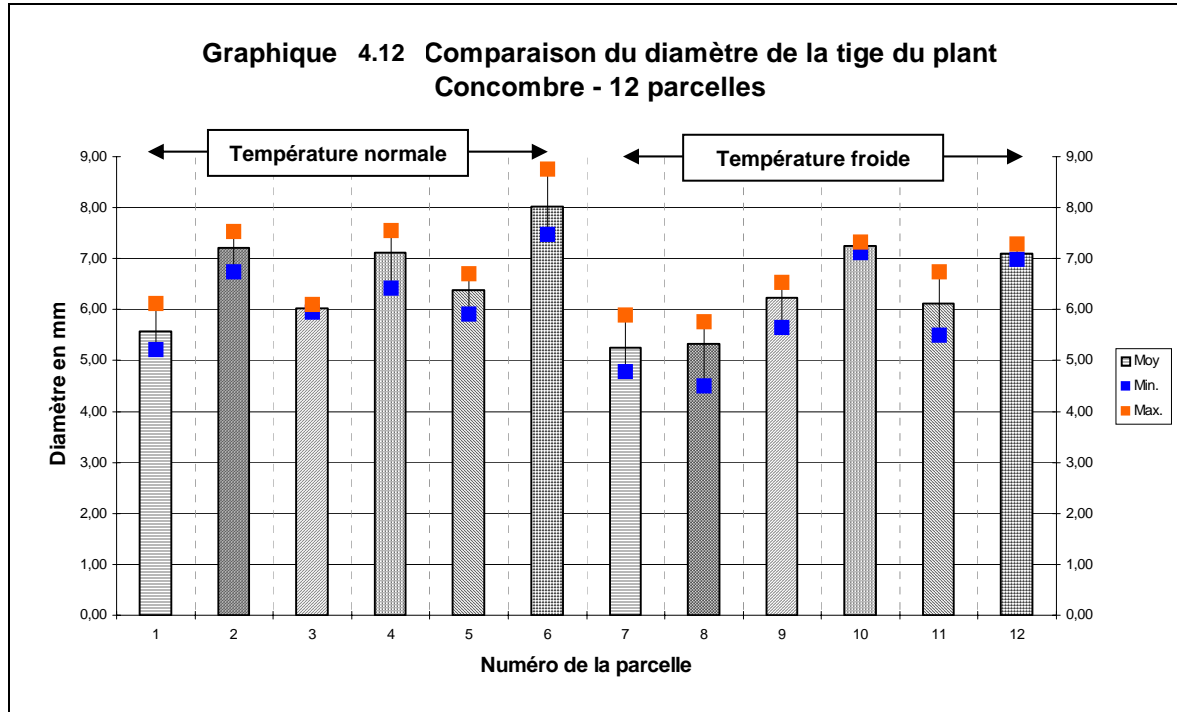
4.3.1. Nombre de feuilles



* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

L'utilisation du tapis chauffant accroît la vitesse de production de feuilles. Nous obtenons les meilleurs résultats chez les plants bénéficiant des tapis chauffants et de l'éclairage artificiel dans la zone de température normale. Autre constatation intéressante, nous retrouvons davantage de feuilles chez les plants sur tapis chauffant en zone froide que les plants situés en zone normale sans tapis chauffant.

4.3.2. Diamètre de la tige

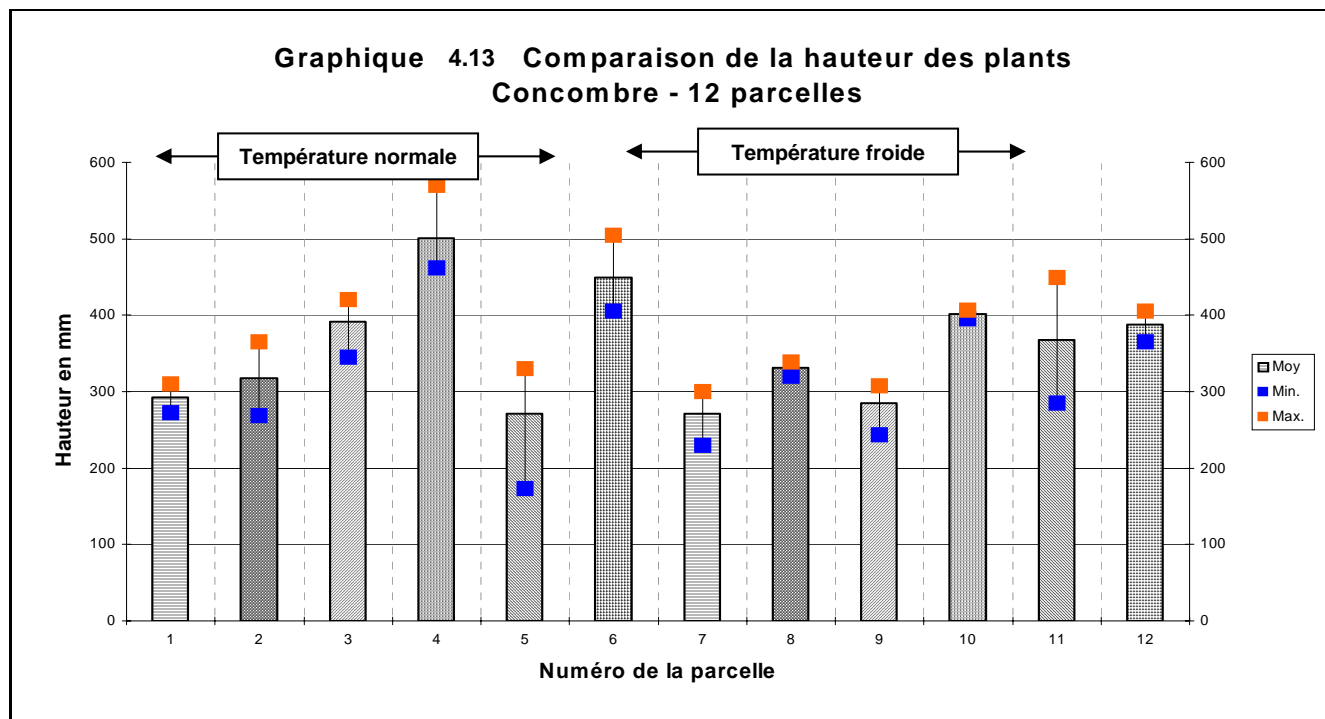


* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 7. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

L'utilisation du tapis chauffant accroît le diamètre de la tige (+ 18 %). Nous obtenons les meilleurs résultats chez les plants bénéficiant des tapis chauffants et de l'éclairage artificiel 100 % HPS dans la zone de température normale. Également, nous retrouvons de plus gros diamètres chez les plants sur tapis chauffant en zone froide que chez ceux situés en zone normale sans tapis chauffants, à l'exception de la zone sans éclairage artificiel.

Il ne faut pas oublier que 18 % de plus en diamètre de tige signifie en réalité une aire de tige supérieure de 39 % donc autant de capacité de circulation pour la sève du futur plant.

4.3.3. Hauteur des plants

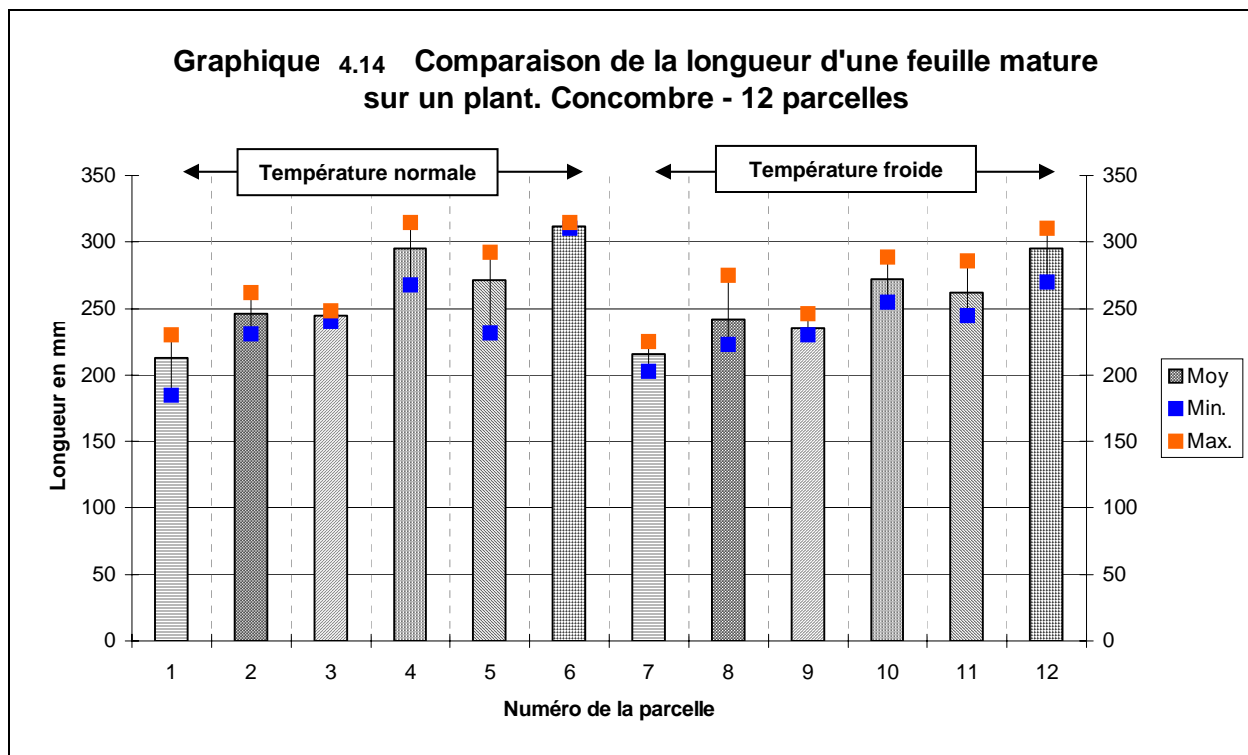


* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

L'utilisation des tapis chauffants a eu un effet positif sur la croissance en hauteur chez les transplants de concombre.

Une explication possible pour expliquer la taille plus grande des plants de concombres situés sur tapis en zone froide que les plants de concombres situés sur tapis en zone chaude, serait le temps d'utilisation des tapis. En moyenne, sur une période de 24 heures, les tapis en zone froide ont fonctionné durant 18,61 heures tandis que les tapis chauffants situés en zone de température normale ont fonctionné de 17,19 heures. Les tapis chauffants en zone froide ont donc fonctionné 1,48 heure de plus par jour que ceux situés dans l'autre zone. On observe aussi que les plants de concombres situés sur tapis chauffants en zone froide sont plus grands que les plants de concombres n'étant pas sur tapis en zone de température normale.

4.3.4. Longueur d'une feuille mature

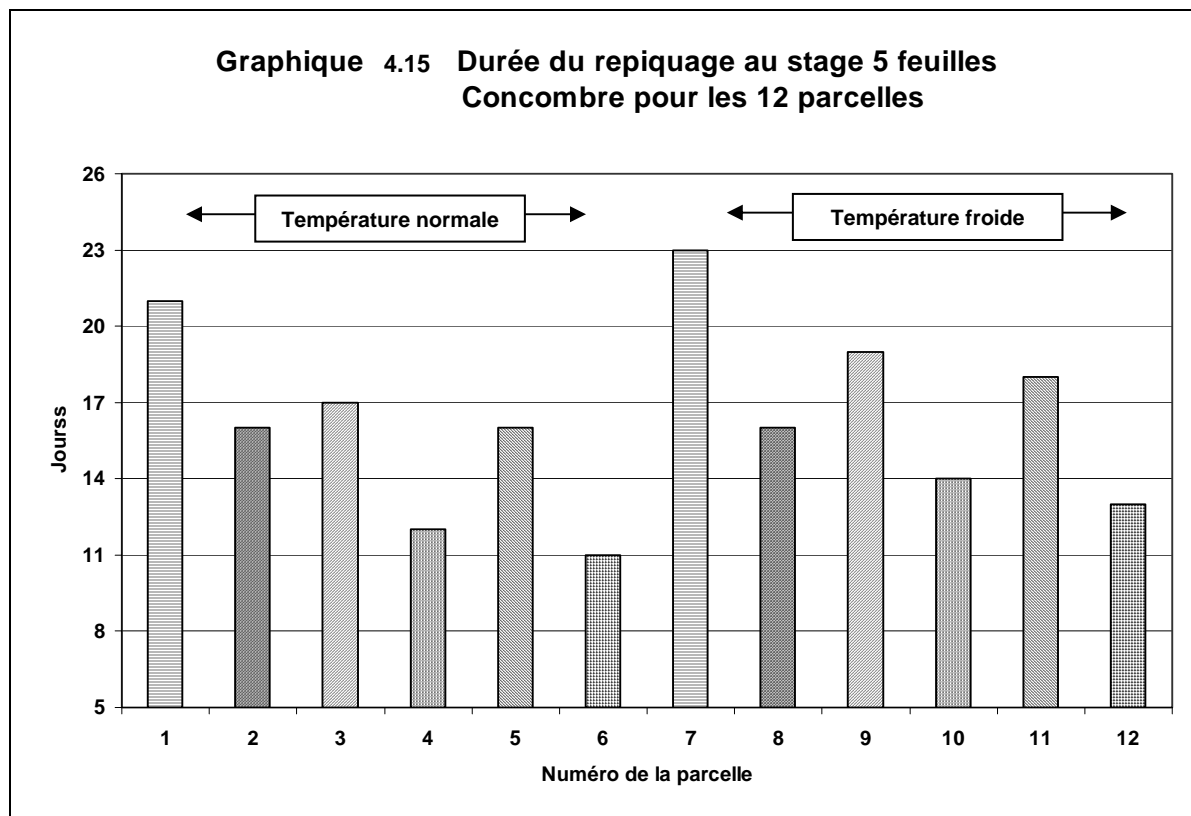


* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

La longueur d'une feuille mature a été plus grande au niveau des plants situés sur tapis que les plants n'étant pas situés sur tapis.

4.3.5. Durée de culture

Le stade de 5 feuilles a été utilisé pour établir un même seuil de maturité dans les divers traitements (voir le tableau 4.3, colonne « Date fin »). En moyenne, nous avons atteint le stade de maturité sur les tapis plus rapidement. Voici notre constat des économies en temps en fonction des parcelles expérimentales (voir le graphique 4.15 et le tableau 4.3).



* Voir la description du traitement de chaque parcelle à la page 9. Les bâtonnets à motifs non-lignés représentent les parcelles avec tapis chauffants.

Tableau 4.3 - Durée de l'étape des semis et transplants chez les plants de concombres

#	Zone	Utilisation tapis	Date semis	Repiquage	Date fin	Durée totale		Durée repiquage-fin	
						Jour	Semaine	Jour	Semaine
1	Chaude		14-janv-05	27-janv-05	17-févr-05	34	4,9	21	3,0
2	Pas d'éclairage	X	14-janv-05	27-janv-05	12-févr-05	29	4,1	16	2,3
3	Chaude		14-janv-05	27-janv-05	13-févr-05	30	4,3	17	2,4
4	éclairage 2*	X	14-janv-05	27-janv-05	08-févr-05	25	3,6	12	1,7
5	Chaude		14-janv-05	27-janv-05	12-févr-05	29	4,1	16	2,3
6	100% HPS	X	14-janv-05	27-janv-05	7-févr-05	24	3,4	11	1,6
7	Froide		14-janv-05	27-janv-05	19-févr-05	36	5,1	23	3,3
8	Pas d'éclairage	X	14-janv-05	27-janv-05	12-févr-05	29	4,1	16	2,3
9	Froide		14-janv-05	27-janv-05	15-févr-05	32	4,6	19	2,7
10	Éclairage 2*	X	14-janv-05	27-janv-05	10-févr-05	27	3,9	14	2,0
11	Froide		14-janv-05	27-janv-05	14-févr-05	31	4,4	18	2,6
12	100% HPS	X	14-janv-05	27-janv-05	9-févr-05	26	3,7	13	1,9

*Éclairage combiné avec HPS et Led

Nous avons noté un développement racinaire supérieur au niveau des plants situés sur tapis. En plus d'arriver au stade de 5 feuilles plus rapidement, les transplants de concombres sur tapis ont bénéficié d'un développement racinaire supérieur ce qui leur permettra un enracinement plus rapide dans le pain de substrat.

En général, l'utilisation des tapis chauffants s'avère avantageuse sur le plan agronomique.

Il y a eu gain de rendement au niveau de tous les critères évalués dans ce projet. De plus, les racines se trouvent beaucoup plus développées avec le tapis chauffant¹⁵. Le temps de culture épargné par l'utilisation du tapis chauffant peut représenter un gain économique significatif.

¹⁵ Voir la photo 13 dans l'annexe 1.

5. Évaluation des dépenses énergétiques et des économies engendrées par l'utilisation des tapis chauffants

5.1. Objectifs

- Répartir et normaliser les consommations d'énergie obtenues en fonction des différents traitements par variété de plants
- Évaluer les coûts énergétiques par plant des différents traitements selon les variétés de plants

5.2. Généralités

Les tapis chauffants ont pour but de distribuer la chaleur directement au niveau racinaire des plants. Le postulat de départ est que l'utilisation des tapis chauffants créera un micro climat autour des jeunes plants. De ce fait, nous pourrions réduire la température ambiante de quelques degrés sans affecter le rendement et la qualité des plants.

Le lecteur trouvera dans cette section les éléments liés à l'économie d'énergie seulement, car les aspects agronomiques ont été traités antérieurement. À l'origine, le projet visait une différence de trois degrés Celsius entre la zone froide et la zone normale. En analysant les données climatiques de la serre, nous avons eu une différence de température plus faible que prévu. En effet, nous avons eu en moyenne une différence sur 24 heures de 0,95 °C. Ceci peut s'expliquer par un excès de chaleur que la serre n'aurait pas réussi à évacuer durant le jour^{16 17}.

5.3. Méthodologie

Le système de chauffage au gaz naturel est le même pour les deux zones. Cette chaleur est distribuée par des tubes en polyéthylène au sol. La température de l'air ambiant est contrôlée par un système de contrôle Damatex. La sonde a été placée dans un premier temps dans la zone froide et plus tard dans le projet dans la zone normale. Comment distribuons-nous cette chaleur en fonction des zones? Tout simplement selon le patron de perçage des tubes. Après plusieurs essais, nous avons pu créer artificiellement nos deux zones de température¹⁸.

Si cette technique nous permet d'avoir un certain contrôle sur la température des deux zones, elle ne nous permet pas d'évaluer les consommations d'énergie (gaz naturel). En effet, même si nous avons les consommations en gaz, nous ne pouvons pas, de façon précise, évaluer :

- la portion qui va dans une zone versus l'autre
- l'efficacité énergétique des différents traitements en fonction de la réalité des producteurs (utilisation optimum de la superficie plancher de serre, utilisation au besoin de l'écran thermique et non à temps plein).

¹⁶ Qu'est ce qui a pu contribuer à obtenir cette situation? Ça peut être une combinaison de plusieurs éléments : journée ensoleillée, journée chaude, ventilation moins performante due à l'utilisation de polyéthylène et de l'écran thermique fermé en tout temps, polyéthylène séparant les deux zones de température a un facteur isolant faible, système de distribution de chaleur non optimum.

¹⁷ Le mois de février 2005 a été plus chaud que la normale selon Environnement Canada d'environ 3°C

¹⁸ Nous étions plus en mesure d'atteindre la différence de température désirée lorsque le soleil n'était pas présent

Pour ce faire, nous avons développé un modèle mathématique pour être en mesure d'évaluer quelle serait la consommation d'énergie pour chacun(e) des :

- variétés de plantes
- traitements

Voici la procédure et la méthodologie utilisée :

A. Établir les performances énergétiques de la serre dans laquelle nous avons fait les traitements. Pour ce faire, nous avons évalué le ratio d'efficacité énergétique de la serre ($\text{kWh} / \text{m}^2 / 100 \text{ DJ}$) en prenant les données du mois de février. Ce facteur tient compte de :

- nos consommations d'énergies
- la superficie des serres chauffées
- la moyenne par jour de degrés-jours¹⁹ (DJ) de chauffage à 18 °C
- la température moyenne à l'intérieur de la serre (deux zones de température combinées)

De façon générale, un producteur efficient sur le plan énergétique aurait un ratio d'efficacité de « 1.05 à 1.15 » pour une production hivernale. Plus la valeur est basse, plus le producteur est efficient. Le ratio d'efficacité énergétique obtenu a été de 0.64 $\text{kWh} / \text{m}^2 / 100 \text{ DJ}$; il est meilleur de 34 % parce que nous avons maintenu l'écran thermique fermé pour toute la durée du projet.

B. Ramener la fin des cultures pour une même date de sortie soit le 13 mars. Cette date a été choisie de façon arbitraire pour notre scénario.

¹⁹ Les degrés-jours sont une unité empirique exprimant la différence journalière en degré Celsius (ou Fahrenheit) entre une température de base et la température moyenne extérieure sur 24 heures lorsque cette dernière tombe en dessous de la température de base (ou d'une température de référence).

Tableau 5.1 – Consommation réelle des différentes sources d'énergie pour février

Entreprise : **CIDES - Projet tapis, énergie consommée pour chauffage en février**

Date réalisée : 24-août-05

Combustible		Pour la période du		au	28-févr-05	aaaa/mm/jj	Consommation	Coût / unité \$	Consommation en kWh	Date réalisée	
		01-févr-05	Inventaire début							Inventaire fin	Achats
Huile n° 2	Litres										
	\$										
Gaz naturel	Mètres ³				778		778		6 232		54,6
	\$				385,11		385	0,495		0,062	52,0
Propane	Litres										
	\$										
Électricité	kWh				3 822		3 822		3 822		33,5
	\$				267,55		267,55	0,070		0,070	36,1
Tapis	Unités				1 265		1 265,4		1 265		11,1
	\$				88,58		89	0,070	89	0,070	11,9
Éclairage - 70%	Unités										
	\$										
Total	Unités								11 408		
	\$				741		741			0,065	

Équivalence

Combustible	Taux de transformation	Équivalence nette Kwh / unité
1 litre d'huile n° 2	70%	7,75
1 m ³ de gaz	80%	8,01
1 litre de propane	75%	5,37
1kWh d'électricité	100%	1,00
1kWh d'électricité	100%	1,00

Le taux de transformation peut varier selon les différents systèmes et équipements de chauffage et leur entretien.

Hypothèse:

L'énergie pour l'éclairage est utilisée à 70% pour le chauffage, car les écrans thermiques sont fermés.

Tableau 5.2 – Calcul du ratio d'efficacité énergétique pour février

Entreprise : **CIDES - Projet tapis, énergie consommée pour chauffage en février**

Date réalisée : 24-août-05

Colonne	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Opération	Superficie de culture chauffée pi ²	Nombre de jours	Superficie-temps pi ² -jours	Moyenne par jour de DJ de chauffage à 18° C *	Température intérieure moyenne °C	DJ de chauffage corrigée	pi ² -DJ	Consommation	
								m ³ par 1 000 pi ² -jour	gaz Total m ³
janvier-05				28,4	-	-			
février-05	2 250	28	63 000	24,1	22,1	28,2	1 777 230	22,6	1 424
mars-05				20,4	-	-			
avril-05				12,3	-	-			
mai-05				5,4	-	-			
juin-05				1,5	-	-			
juillet-05				0,3	-	-			
août-05				0,8	-	-			
septembre-05				4,0	-	-			
octobre-05				9,7	-	-			
novembre-05				16,4	-	-			
décembre-05				25,0	-	-			
Total		28	63 000	675		789,9	1 777 230		1 424
Moyenne	2 250			24,1	22,1	28,2		22,6	

DJ = * Dorval, normale 1961-1990
DJ = Février 2005 - Dorval

Superficie-temps en pi²-an 173 (calcul des pi ² -an = total de la colonne 3. divisé par 365)	Total des DJ de chauffage par pi²-an 10 297 100 DJ / pi ² -an 103,0 Total de la colonne 7 divisé par les pi ² -an divisé par 100
--	--

Ratio d'efficacité : kWh / pi² / 100 DJ 0,64 Calcul du ratio = combustible consommé en kWh / (Total de la colonne 7 / 100) Total du combustible consommé en kWh = 11 408	kWh par unité de combustible = 8,01
--	--

- C. Établir l'utilisation de l'espace-temps (π^2 -jrs) que chaque culture aurait normalement chez un producteur, mais en utilisant les résultats de durée de culture obtenus dans nos traitements. Ainsi, nous avons calculé l'espace-temps en fonction du 13 mars. Ceci est fait de façon distincte pour le poivron, la tomate et le concombre. En effet, au début du repiquage les plants ne couvrent pas toute la surface de la serre. Après un certain temps (selon la croissance des plants), le producteur va répartir les plants sur une plus grande surface. En fonction du 13 mars et du nombre de jours qu'un plant a pris pour obtenir sa floraison (à partir des données réelles), nous avons estimé une nouvelle date de repiquage pour évaluer à partir du modèle nos besoins de chauffage qui couvrent cette nouvelle période.
- D. Établir les besoins de chauffage selon les durées et superficies de serre utilisées par plant afin d'arriver à la quantité d'énergie nette établie selon chaque traitement. Pour ce faire, nous avons évalué les π^2 -DJ en fonction du type de plant, du traitement, de la superficie utilisée par les plants et du ratio d'efficacité énergétique de la serre.
- E. Répartir les besoins de chauffage en fonction des systèmes utilisés dans ce projet. En connaissant nos besoins, nous avons estimé la contribution des tapis chauffants et de la chaleur dégagée par l'éclairage artificiel. Par la suite, nous avons pu évaluer nos besoins en gaz naturel.
- Tapis chauffant : 100 % de l'énergie consommée a été utilisée pour répondre à nos besoins de chauffage²⁰.
 - Éclairage artificiel (HPS, HPS+LED) : 70 % de l'énergie consommée a été utilisée pour répondre au besoin de chauffage.
 - Gaz naturel : Nous l'avons estimé en déduisant nos besoins totaux de chauffage de l'énergie utilisée pour les tapis et de l'éclairage artificiel.
- F. Évaluer nos coûts d'énergie par plant. Nous avons tout simplement additionné nos consommations d'énergie des tapis chauffants, de l'éclairage artificiel (consommation totale d'énergie des lampes) et du gaz naturel. Les coûts d'énergie par plant et par traitement ont été évalués selon le prix moyen des sources d'énergie.^{21 22}

Le lecteur trouvera à l'annexe 5 les principaux résultats provenant du modèle mathématique.

²⁰ Dans notre simulation, il y a des cas où la consommation d'énergie des tapis dépassait légèrement nos besoins énergétiques. De ce fait, nous avons ajusté la consommation d'énergie des tapis chauffants à nos besoins d'énergie. Il est fort probable que dans certaine situation, les tapis chauffants dépassaient nos besoins en chauffage.

²¹ Gaz naturel = 0.495\$/m³ - Note : Tarif Gaz Métropolitain (estimation-tarif D1). Ceci inclut : le gaz naturel, gaz de compression, transport, équilibrage, les ajustements reliés aux inventaires, la distribution.

²² Électricité = 0.07\$/kWh - Note : Hydro-Québec (estimation-tarif D). Ceci inclus : la redevance d'abonnement par jour, le prix des premiers 30 kWh par jour et l'excédent de 50 kW en période d'hiver (1er décembre au 31 mars - Dans notre cas, nous ne l'avons pas dépassé).

6. Résultats et discussion - Aspects énergétiques

Les éléments évalués pour une même période de culture (mesurage le 14 mars 2005) ont été :

- la quantité d'espace-temps dans la serre par plant ($\text{pi}^2\text{-jrs/plant}$)
- la quantité d'énergie par plant (kWh/plant)
- le coût d'énergie par plant (\$/plant)

Dans cette section, le lecteur trouvera un résumé concernant les effets de :

- diminuer ou non la température ambiante
- utiliser ou non les tapis chauffants
- utiliser ou non l'éclairage artificiel (100 % HPS et LED+HPS)

Remarques :

- Les $\text{pi}^2\text{-jrs/plant}$ sont un indice de la superficie et du nombre de jours qu'un plant utilise dans une serre. Plus la valeur est basse, moins grands seront les coûts d'énergie.
- Le nombre de jours qu'un plant va utiliser avec une superficie de 0,11 pi et de 1 pi est lié au type de plante.
- Il est bon de se rappeler que la moyenne des températures ambiantes sur 24 heures ne diffère que de 0.95 °C.
- Les coûts d'énergie par plant pourraient changer en fonction des coûts des différentes sources d'énergie et de l'efficacité énergétique réelle des différents systèmes générant de la chaleur. Présentement, le prix du gaz naturel et de l'électricité est semblable (coût de l'électricité supérieure d'environ 10% par rapport au gaz naturel, en tenant compte des équivalences énergétiques et du rendement des systèmes générant la chaleur). En conséquence, les fluctuations des coûts suivront les fluctuations des quantités d'énergie par plant présenté dans la section précédente.
- Les coûts d'énergie par plant ne tiennent pas compte des coûts des immobilisations et d'opération.
- Évidemment, nous recherchons toujours à diminuer l'énergie et les coûts d'énergie utilisés pour un plant.
- Vous retrouverez à l'annexe 6 l'analyse des données.

6.1. Résultats pour le poivron

6.1.1. Quantité d'espace – temps dans la serre par plant (pi²-jrs/plant)

Avec la méthodologie que nous avons utilisée pour évaluer l'espace-temps par plant et les résultats obtenus, nous observons les éléments suivants :

- Température ambiante : La diminution de la température ambiante augmente la quantité de l'espace-temps dans la serre. Cet effet est d'environ 4 % lorsqu'il n'y a pas d'éclairage artificiel et de 13 % avec de l'éclairage artificiel.
- Tapis : Quelle que soit la zone de température, l'utilisation du tapis a permis d'une part une réduction de 14 % de la quantité d'espace-temps dans la serre dans le cas où il n'y a pas d'éclairage artificiel. D'autre part, pour les zones éclairées artificiellement, l'effet a été d'environ 20 %.
- Éclairage : L'effet de l'éclairage diminue la quantité de l'espace-temps dans la serre d'environ 30 % pour la zone froide et de 35 % pour la zone normale.
- L'utilisation du tapis chauffant avec la combinaison de lampes 100 % HPS dans la zone à température normale est le traitement qui optimise davantage l'utilisation de l'espace-temps dans la serre. En effet, la quantité d'espace-temps est deux fois moindre dans ce cas-là par rapport au traitement où il n'y a pas d'éclairage artificiel, ni de tapis chauffant dans la zone froide.

Tableau 6.1 - Superficie et temps de culture utilisés après repiquage pour la production d'un plant de poivron au 13 mars

#	Zone *	Utilisation tapis	Repiquage	Date fin	# de jours et superficie utilisée			
					0,11 pi ² jrs **	1,0 pi ² jrs	Total jrs	pi ² -jrs
1	Chaude - PE		6-janv	13-mars	40	26	66	30,8
2	Chaude - PE	X	15-janv	13-mars	34	23	57	26,6
3	Chaude – E2		28-janv	13-mars	26	18	44	20,5
4	Chaude – E2	X	3-févr	13-mars	23	15	38	17,7
5	Chaude - HPS		29-janv	13-mars	26	17	43	20,1
6	Chaude - HPS	X	7-févr	13-mars	20	14	34	15,9
7	Froide - PE		3-janv	13-mars	41	28	69	32,2
8	Froide - PE	X	13-janv	13-mars	35	24	59	27,5
9	Froide – E2		21-janv	13-mars	31	20	51	23,8
10	Froide – E2	X	31-janv	13-mars	25	16	41	19,1
11	Froide - HPS		22-janv	13-mars	30	20	50	23,3
12	Froide - HPS	X	2-févr	13-mars	23	16	39	18,2

* PE = Pas d'éclairage; E2 = HPS+LED ; HPS = 100 % HPS

** 60 % de la durée totale est attribuée à cette étape

6.1.2. Quantité d'énergie par plant (kWh/plant)

Avant tout, il faut se rappeler que la consommation d'énergie par plant est tributaire de l'espace-temps utilisé. Avec la méthodologie que nous avons utilisée pour évaluer la quantité totale d'énergie utilisée par plant et les résultats obtenus, nous observons les éléments suivants :

- Température ambiante : pour la zone sans éclairage artificiel, la diminution de la température ambiante ne donne pas de gain net quant à la quantité d'énergie utilisée par plant. En effet, les gains quotidiens d'énergie sont contrebalancés par le rallongement de la durée de culture. Lorsque nous utilisons l'éclairage artificiel, la zone normale a une consommation d'énergie inférieure en moyenne de 7 % par rapport à la zone froide.
- Tapis : L'utilisation du tapis a permis une réduction de 15 % de la quantité totale d'énergie dans le cas où il n'y a pas d'éclairage artificiel, quelle que soit la température ambiante. Pour les zones éclairées artificiellement, l'effet a été en moyenne d'environ 22 %. Les gains d'économie d'énergie semblent dans les deux zones de températures plus importantes lorsque nous utilisons les lampes 100 % HPS ($\approx 25\%$) versus l'éclairage combiné (LED+HPS $\approx 18\%$).
- Éclairage : L'effet de l'éclairage diminue la quantité totale d'énergie utilisée par plant d'environ 29 % pour zone froide et de 34 % pour la zone normale.
- L'utilisation du tapis chauffant avec la combinaison de lampes 100 % HPS dans la zone à température normale est le traitement qui minimise la quantité d'énergie utilisée par plant. En effet, la quantité d'énergie consommée par plant est presque deux fois moindre dans ce cas-là que dans le traitement où il n'y a pas d'éclairage artificiel, ni de tapis chauffant dans la zone froide (2.99 kWh versus 5.81 kWh).

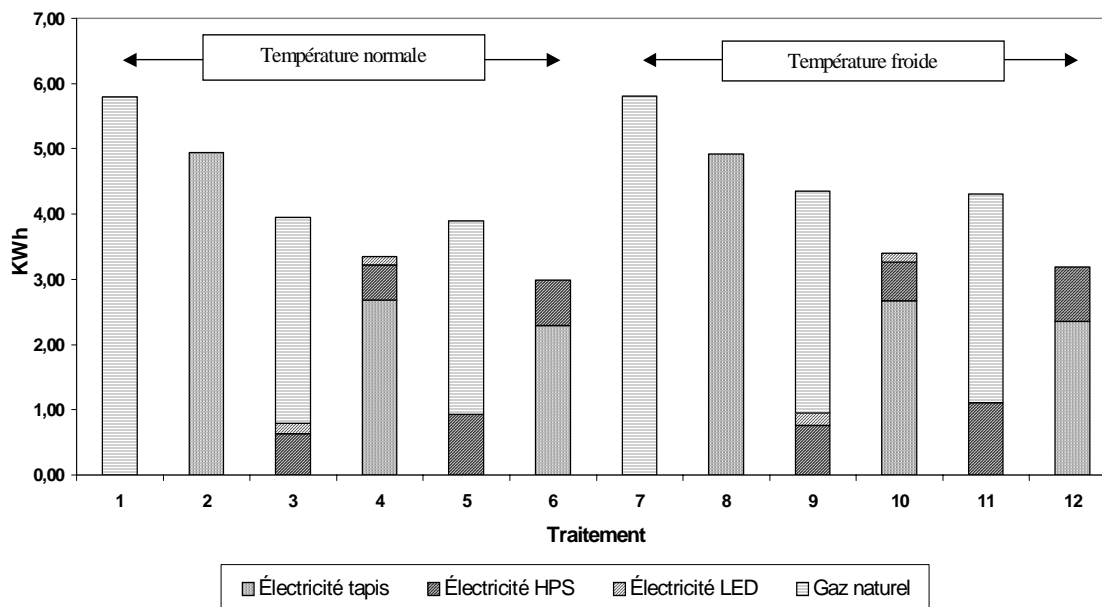
Tableau 6.2 - Quantité d'énergie (kWh) requise pour la production d'un plant de poivron au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet

#	Zone *	Utilisation tapis	kWh / plant				Total
			Tapis chauffant	Éclairage HPS	Éclairage LED	Chauffage au gaz **	
1	Chaude - PE					5,79	5,79
2	Chaude - PE	X	4,94				4,94
3	Chaude - E2			0,64	0,16	3,16	3,95
4	Chaude - E2	X	2,68	0,53	0,13		3,35
5	Chaude - HPS			0,93		2,97	3,90
6	Chaude - HPS	X	2,29	0,70			2,99
7	Froide - PE					5,81	5,81
8	Froide - PE	X	4,92				4,92
9	Froide - E2			0,76	0,19	3,41	4,35
10	Froide - E2	X	2,67	0,59	0,14		3,40
11	Froide - HPS			1,11		3,20	4,31
12	Froide - HPS	X	2,36	0,83			3,19

* PE = Pas d'éclairage; E2 = HPS+LED ; HPS = 100 % HPS

** 8.01 kWh par m de gaz naturel pour un taux de transformation de 80 %

Graphique 6.1 - Quantité d'énergie (kWh) requise pour la production d'un plant de poivron au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet



6.1.3. Coût d'énergie par plant (\$/plant)

Avec la méthodologie que nous avons utilisée pour évaluer le coût d'énergie par plant et les résultats obtenus, nous observons les éléments suivants :

- Température ambiante : Dans la zone froide et sans éclairage artificiel, nous avons obtenu un coût d'énergie supplémentaire par plant d'environ 1 % par rapport à la zone de température normale avec utilisation ou non de tapis. Lorsque nous utilisons l'éclairage artificiel, la zone normale a une consommation d'énergie inférieure en moyenne de 11 % par rapport à la zone froide.
- Tapis : L'utilisation du tapis a permis une réduction d'environ 4 % du coût d'énergie par plant dans le cas où il n'y a pas d'éclairage artificiel, quelle que soit la température ambiante. Pour les zones éclairées artificiellement, l'effet a été en moyenne d'environ 15 %. La réduction des coûts semble pour les deux zones plus importantes avec l'utilisation des HPS versus l'éclairage combiné (LED+HPS).
- Éclairage : L'éclairage diminue le coût d'énergie utilisée par plant d'environ 28 % pour la zone froide et de 33 % pour la zone normale.
- L'utilisation du tapis chauffant avec la combinaison de lampes 100 % HPS dans la zone à température normale est le traitement qui minimise le coût d'énergie utilisée par plant. En effet, le coût d'énergie par plant est 58 % moindre dans ce cas-là que dans le traitement où il n'y a pas d'éclairage artificiel, ni de tapis chauffant dans la zone froide (0.209 \$/plant versus 0.0359 \$/plant).

Tableau 6.3 - Coûts d'énergie requise pour la production d'un plant de poivron au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet

#	Zone *	Utilisation tapis	\$ d'énergie / plant				Total
			Tapis chauffant	Éclairage HPS	Éclairage LED	Chauffage au gaz **	
1	Chaude - PE					0,358	0,358
2	Chaude - PE	X	0,346				0,346
3	Chaude - E2			0,045	0,011	0,195	0,251
4	Chaude - E2	X	0,188	0,037	0,009		0,234
5	Chaude - HPS			0,065		0,183	0,248
6	Chaude - HPS	X	0,160	0,049			0,209
7	Froide - PE					0,359	0,359
8	Froide - PE	X	0,344	0,000	0,000		0,344
9	Froide - E2			0,053	0,013	0,211	0,277
10	Froide - E2	X	0,187	0,041	0,010		0,238
11	Froide - HPS			0,078		0,198	0,276
12	Froide - HPS	X	0,165	0,058			0,223

* PE = Pas d'éclairage; E2 = HPS+LED ; HPS = 100 % HPS

** 8.01 kWh par m de gaz naturel pour un taux de transformation de 80 %

6.2. Résultats pour la tomate

6.2.1. Quantité d'espace-temps dans la serre par plant (pi²-jrs/plant)

Avec la méthodologie que nous avons utilisée pour évaluer l'espace-temps par plant et les résultats obtenus, nous observons les éléments suivants :

- Température ambiante : La diminution de la température ambiante a augmenté la quantité d'espace-temps dans quatre des six traitements. L'effet (4%) a été plus important là où il n'y avait pas d'éclairage artificiel.
- Tapis : L'utilisation du tapis a, en moyenne, permis une réduction d'environ 2.4 % de la quantité d'espace-temps dans la serre. Dans les cas où il n'y a pas d'éclairage artificiel, quelle que soit la température ambiante, l'effet est légèrement plus important. Pour les zones éclairées, seulement 2 des quatre traitements ont bénéficié d'une réduction de l'espace-temps.
- Éclairage : De façon générale, l'éclairage artificiel 100 % HPS a diminué d'environ 27 % la quantité d'espace-temps. Tandis que l'éclairage combiné, la diminution été d'environ 24 % pour l'éclairage combiné (LED+HPS).
- Le gain en espace-temps est relativement faible. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les transplants ont été produits dans des régimes de températures assez élevés pour la tomate.

Tableau 6.4 - Superficie et temps de culture utilisés après repiquage pour la production d'un plant de tomate au 13 mars

#	Zone	Utilisation tapis	Repiquage	Date fin	# de jours et superficie utilisée			
					0,11 pi ² jrs **	1,0 pi ² jrs	Total jrs	pi ² -jrs
1	Chaude - PE		6-janv	13-mars	17	21	38	22,8
2	Chaude - PE	X	15-janv	13-mars	17	20	37	22,2
3	Chaude – E2		28-janv	13-mars	13	16	29	17,4
4	Chaude – E2	X	3-févr	13-mars	13	16	29	17,4
5	Chaude - HPS		29-janv	13-mars	13	15	28	16,8
6	Chaude - HPS	X	7-févr	13-mars	12	15	27	16,2
7	Froide - PE		3-janv	13-mars	18	22	40	24,0
8	Froide - PE	X	13-janv	13-mars	17	21	38	22,8
9	Froide – E2		21-janv	13-mars	14	16	30	18,0
10	Froide – E2	X	31-janv	13-mars	13	16	29	17,4
11	Froide - HPS		22-janv	13-mars	13	15	28	16,8
12	Froide - HPS	X	2-févr	13-mars	13	15	28	16,8

* PE = Pas d'éclairage; E2 = HPS+LED ; HPS = 100 % HPS

** 45 % de la durée totale est attribuée à cette étape

6.2.2. Quantité d'énergie par plant (kWh/plant)

Avant tout, il faut se rappeler que la consommation d'énergie par plant est tributaire de l'espace-temps utilisé. Avec la méthodologie que nous avons utilisée pour évaluer la quantité totale d'énergie utilisée par plant et les résultats obtenus, nous observons les éléments suivants :

- Température ambiante : La diminution de la température ambiante a légèrement diminué la quantité d'énergie requise pour faire un plant pour tous les traitements. L'effet moyen a été de 2.1 %.
- Tapis : Nous avons eu des réductions de la quantité d'énergie par plant pour cinq des six traitements. L'effet moyen a été de 2.4 %.
- Éclairage : L'éclairage diminue la quantité d'énergie utilisée par plant d'environ 22 % pour les deux zones de température. L'effet est plus important avec l'éclairage 100 % HPS d'environ 4 % par rapport au HPS+LED, dans les deux zones.
- L'éclairage contribue davantage à la réduction de la quantité d'énergie par plant que l'utilisation des tapis. Le traitement optimum est l'utilisation des tapis chauffants avec éclairage 100 % HPS indépendamment des zones de température. Le traitement le moins avantageux est dans la zone de température normale, sans tapis chauffants et éclairage.

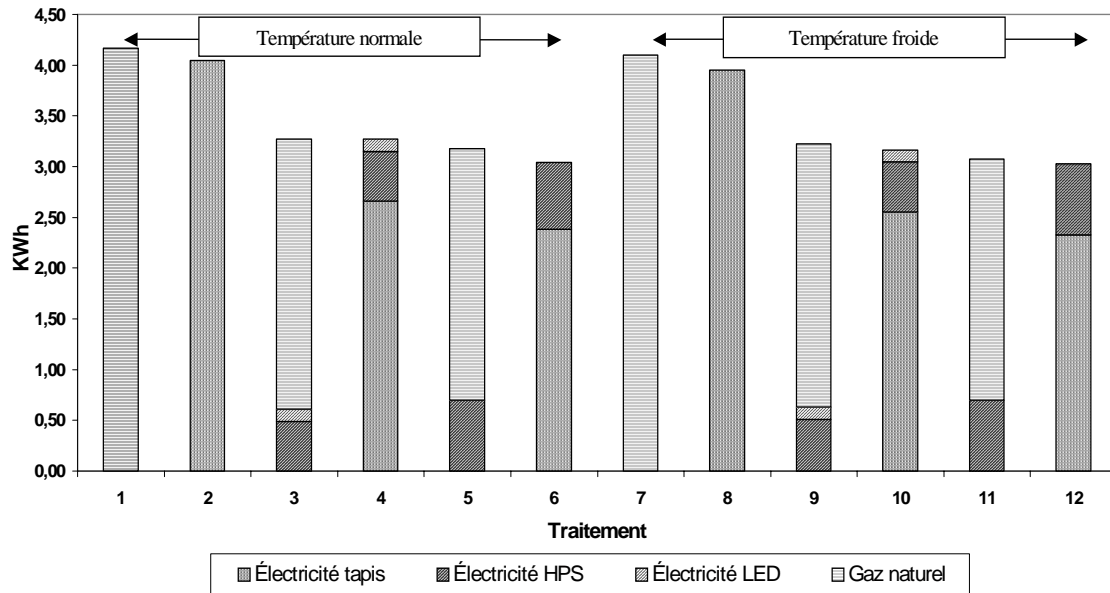
Tableau 6.5 - Quantité d'énergie (kWh) requise pour la production d'un plant de tomate au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet

#	Zone *	Utilisation tapis	KWh / plant				Total
			Tapis chauffant	Éclairage HPS	Éclairage LED	Chauffage au gaz **	
1	Chaude - PE					4,16	4,16
2	Chaude - PE	X	4,04				4,04
3	Chaude – E2			0,49	0,12	2,66	3,27
4	Chaude – E2	X	2,66	0,49	0,12		3,27
5	Chaude - HPS			0,70		2,48	3,18
6	Chaude - HPS	X	2,38	0,66			3,05
7	Froide - PE					4,10	4,10
8	Froide - PE	X	3,95				3,95
9	Froide – E2			0,51	0,12	2,59	3,23
10	Froide – E2	X	2,55	0,49	0,12		3,16
11	Froide - HPS			0,70		2,37	3,07
12	Froide - HPS	X	2,32	0,70			3,02

* PE = Pas d'éclairage; E2 = HPS+LED ; HPS = 100% HPS

** 8.01 kWh par m de gaz naturel pour un taux de transformation de 80 %

Graphique 6.2 - Quantité d'énergie (kWh) requise pour la production d'un plant de tomate au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet



6.2.3. Coût d'énergie par plant (\$/plant)

Avec la méthodologie que nous avons utilisée pour évaluer le coût d'énergie par plant et les résultats obtenus, nous observons les éléments suivants :

- Température ambiante : La diminution de la température ambiante a légèrement diminué le coût d'énergie par plant pour tous les traitements. L'effet moyen a été de 2 %.
- Tapis : Nous avons eu une augmentation du coût d'énergie par plant dans tous les traitements d'environ 9 %.
- Éclairage : L'effet de l'éclairage artificiel a réduit le coût d'énergie par plant de 21 % sans égard à la zone de température.
- L'éclairage artificiel contribue davantage à la réduction des coûts d'énergie par plant. Le meilleur résultat a été obtenu avec l'utilisation de l'éclairage 100 % HPS et sans tapis chauffant dans la zone froide (0.196 \$/plant). Le traitement le moins avantageux est dans la zone de température chaude, avec tapis chauffants et sans éclairage (0.283 \$/plant).

Tableau 6.6 - Coûts d'énergie requise pour la production d'un plant de tomate au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet

#	Zone *	Utilisation tapis	\$ d'énergie / plant				Total
			Tapis chauffant	Éclairage HPS	Éclairage LED	Chauffage au gaz **	
1	Chaude - PE					0,257	0,257
2	Chaude - PE	X	0,283				0,283
3	Chaude - E2			0,034	0,008	0,164	0,207
4	Chaude - E2	X	0,186	0,034	0,008		0,229
5	Chaude - HPS			0,049		0,153	0,202
6	Chaude - HPS	X	0,167	0,047			0,213
7	Froide - PE					0,253	0,253
8	Froide - PE	X	0,276				0,276
9	Froide - E2			0,036	0,009	0,160	0,205
10	Froide - E2	X	0,179	0,034	0,008		0,221
11	Froide - HPS			0,049		0,147	0,196
12	Froide - HPS	X	0,163	0,049			0,212

* PE = Pas d'éclairage; E2 = HPS+LED ; HPS = 100 % HPS

** 8.01 kWh par m de gaz naturel pour un taux de transformation de 80 %

6.3. Résultats pour le concombre

6.3.1. Quantité d'espace-temps dans la serre par plant ($\text{pi}^2\text{-jrs/plant}$)

Avec la méthodologie que nous avons utilisée pour évaluer l'espace-temps par plant et les résultats obtenus, nous observons les éléments suivants :

- Température ambiante : La diminution de la température ambiante augmente la quantité de l'espace-temps dans la serre. Cet effet est plus prononcé lorsqu'il y a éclairage artificiel (13 % zone éclairée versus 4.5 % zone non éclairée). Cependant, dans la zone sans éclairage artificiel, l'espace-temps a été le même lorsqu'on utilisait le tapis chauffant pour la zone avec la température normale vs la zone avec une température plus froide.
- Tapis : L'utilisation du tapis a permis une réduction fluctuant entre 24 % et 31 %.
- Éclairage : L'effet de l'éclairage diminue la quantité de l'espace-temps dans la serre d'environ 18 % pour la zone froide et de 25 % pour la zone avec une température normale.
- L'utilisation du tapis chauffant avec la combinaison de lampes HPS (100% HPS ou LED+HPS) dans la zone à température normale est le traitement qui optimise davantage l'utilisation de l'espace-temps dans la serre.

Tableau 6.7 - Superficie et temps de culture utilisés après repiquage pour la production d'un plant de concombre au 13 mars

#	Zone *	Utilisation tapis	Repiquage	Date fin	# de jours et superficie utilisée			
					0,11 pi^2 jrs **	1,0 pi^2 jrs	Total jrs	$\text{pi}^2\text{-jrs}$
1	Chaude - PE		6-janv	13-mars	8	13	21	13,5
2	Chaude - PE	X	15-janv	13-mars	6	10	16	10,3
3	Chaude – E2		28-janv	13-mars	7	10	17	11,0
4	Chaude – E2	X	3-févr	13-mars	5	7	12	7,7
5	Chaude - HPS		29-janv	13-mars	6	10	16	10,3
6	Chaude - HPS	X	7-févr	13-mars	4	7	11	7,1
7	Froide - PE		3-janv	13-mars	9	14	23	14,8
8	Froide - PE	X	13-janv	13-mars	6	10	16	10,3
9	Froide – E2		21-janv	13-mars	8	11	19	12,2
10	Froide – E2	X	31-janv	13-mars	6	8	14	9,0
11	Froide - HPS		22-janv	13-mars	7	11	18	11,6
12	Froide - HPS	X	2-févr	13-mars	5	8	13	8,4

* PE = Pas d'éclairage; E2 = HPS+LED ; HPS = 100 % HPS

** 40 % de la durée totale est attribuée à cette étape

6.3.2. Quantité d'énergie par plant (kWh/plant)

Avant tout, il faut se rappeler que la consommation d'énergie par plant est tributaire de l'espace-temps utilisé. Avec la méthodologie que nous avons utilisée pour évaluer la quantité d'énergie utilisée par plant et les résultats obtenus, nous observons les éléments suivants :

- Température ambiante : Le fait de diminuer la température ambiante a donné des résultats variant selon les traitements. Des économies sur la consommation d'énergie ont surtout été réalisées là où il y avait de l'éclairage artificiel et en zone de température normale (2 % à 6 %). Deux traitements ont donné un léger avantage dans la zone froide (avec tapis sans éclairage et avec tapis éclairage HPS).
- Tapis : L'utilisation du tapis a permis une réduction de la quantité d'énergie par plant d'environ 29 % dans la zone normale. Dans la zone froide, l'utilisation du tapis permet une réduction de la quantité d'énergie par plant d'environ 32 %.
- Éclairage : L'effet de l'éclairage diminue la quantité d'énergie utilisée par plant d'environ 19 % pour la zone froide et de 22 % pour la zone normale. L'utilisation du tapis semble amplifier de façon significative l'effet de l'éclairage artificiel.
- L'utilisation du tapis chauffant avec la combinaison de lampes HPS (combiné ou non) est le traitement qui minimise la quantité d'énergie utilisée par plant.

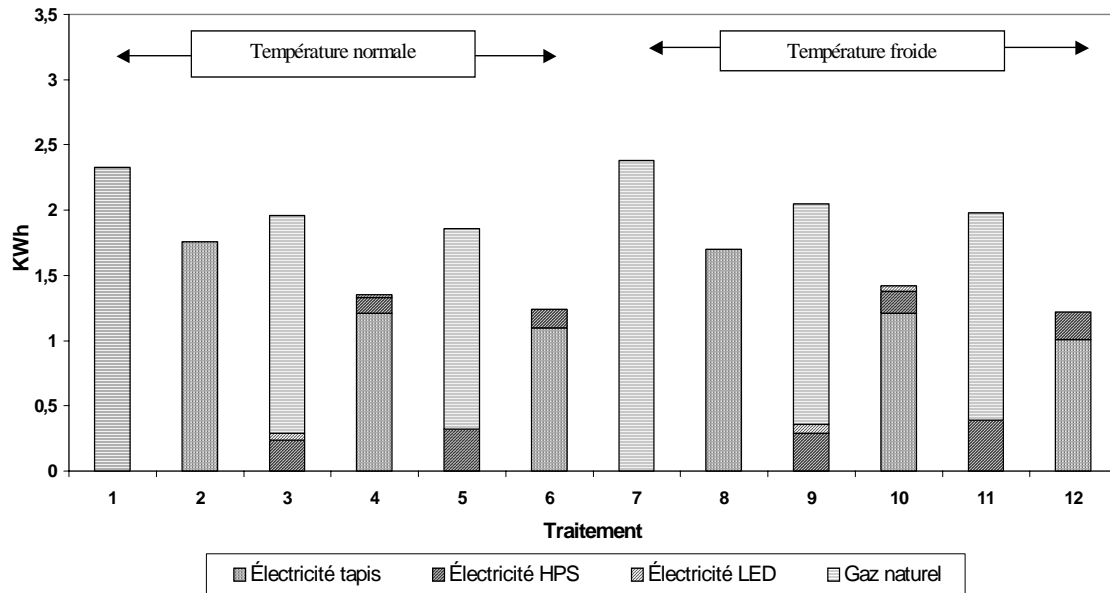
Tableau 6.8 - Quantité d'énergie (kWh) requise pour la production d'un plant de concombre au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet

#	Zone *	Utilisation tapis	KWh / plant				Total
			Tapis chauffant	Éclairage HPS	Éclairage LED	Chauffage au gaz **	
1	Chaude - PE					2,33	2,33
2	Chaude - PE	X	1,76				1,76
3	Chaude – E2			0,24	0,05	1,67	1,96
4	Chaude – E2	X	1,21	0,12	0,02		1,36
5	Chaude - HPS			0,32		1,54	1,86
6	Chaude - HPS	X	1,10	0,14			1,25
7	Froide - PE					2,38	2,38
8	Froide - PE	X	1,70				1,70
9	Froide – E2			0,29	0,07	1,69	2,04
10	Froide – E2	X	1,21	0,17	0,04		1,42
11	Froide - HPS			0,39		1,59	1,98
12	Froide - HPS	X	1,01	0,21			1,22

* PE = Pas d'éclairage; E2 = HPS+LED ; HPS = 100 % HPS

** 8.01 kWh par m de gaz naturel pour un taux de transformation de 80 %

Graphique 6.3 - Quantité d'énergie (kWh) requise pour la production d'un plant de concombre au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet



6.3.3. Coût d'énergie par plant (\$/plant)

Avec la méthodologie que nous avons utilisée pour évaluer le coût d'énergie par plant et les résultats obtenus, nous observons les éléments suivants :

- **Température ambiante** : Le fait de diminuer la température ambiante a donné des résultats variant selon les traitements. Des économies sur le coût d'énergie par plant ont surtout été réalisées là où il y avait de l'éclairage artificiel et en zone de température normale (2 % à 7 %). Deux traitements ont donné un léger avantage dans la zone froide (avec tapis sans éclairage et avec tapis éclairage HPS).
- **Tapis** : L'utilisation du tapis a permis une réduction du coût de l'énergie par plant d'environ 21 % dans la zone normale. Dans la zone froide, l'utilisation du tapis permet une réduction du coût de l'énergie par plant d'environ 25 %.
- **Éclairage** : L'effet de l'éclairage diminue le coût d'énergie par plant d'environ 18 % pour la zone froide et de 21 % pour la zone normale. L'utilisation du tapis semble amplifier de façon significative l'effet de l'éclairage artificiel en faveur d'une réduction du coût de l'énergie par plant.
- L'utilisation du tapis chauffant avec la combinaison de lampes HPS (combiné ou non aux LED) est le traitement qui réduit le plus le coût d'énergie par plant avec un résultat assez semblable pour les deux zones de température. La zone froide sans tapis a affiché le coût d'énergie par plant le plus élevé.

Tableau 6.9 - Coûts d'énergie requise pour la production d'un plant de concombre au 13 mars et selon la méthodologie suivie dans ce projet

#	Zone *	Utilisation tapis	\$ d'énergie / plant				Total
			Tapis chauffant	Éclairage HPS	Éclairage LED	Chauffage au gaz **	
1	Chaude - PE					0,144	0,144
2	Chaude - PE	X	0,123				0,123
3	Chaude – E2			0,017	0,004	0,103	0,124
4	Chaude – E2	X	0,085	0,008	0,002		0,095
5	Chaude - HPS			0,022		0,095	0,117
6	Chaude - HPS	X	0,077	0,010			0,087
7	Froide - PE					0,147	0,147
8	Froide - PE	X	0,119				0,119
9	Froide – E2			0,020	0,005	0,105	0,129
10	Froide – E2	X	0,085	0,012	0,003		0,099
11	Froide - HPS			0,027		0,098	0,126
12	Froide - HPS	X	0,071	0,015			0,086

* PE = Pas d'éclairage; E2 = HPS+LED ; HPS = 100 % HPS

** 8.01 kWh par m de gaz naturel pour un taux de transformation de 80 %

7. Observations et recommandations concernant l'utilisation du tapis chauffant électrique

En général, l'utilisation de ce type de tapis a donné de bons résultats. Cependant, il faudra apporter certaines modifications. En effet, nous avons observé deux lacunes :

- A. La surface lisse et sans pores du tapis a occasionné un drainage déficient. La présence d'eau stagnante sur les tapis après l'irrigation a causé des dommages au niveau des racines des plants de poivrons longeant la surface du tapis.
- B. Les tapis chauffants utilisés pour le projet fonctionnaient à pleine puissance et n'arrivaient pas à garder les températures de consigne du substrat fixées lors des périodes les plus froides.

Ainsi, pour s'assurer un meilleur drainage, il faudra d'une part accentuer la pente des tables et d'autre part modifier la surface des tapis s'il y a lieu (exemples : surface profilée ou encore perforée).

Finalement, il faudra augmenter la puissance de chauffage du tapis pour qu'il puisse être en mesure de répondre adéquatement à nos besoins lors des périodes les plus froides.

8. Conclusion

Nos observations sur la croissance physiologique des concombres et des poivrons nous amènent à des rendements supérieurs lorsque les plants sont sur tapis chauffants dans les deux zones de température. A priori, nous pensions obtenir des économies significatives en diminuant la température ambiante avec l'utilisation de tapis chauffants. Ce qui n'a pas été le cas pour le poivron et le concombre. Pour la tomate, les résultats sont moins probants. De façon générale, l'utilisation du tapis est à son optimum lorsque nous maintenons la température de façon normale et avec éclairage artificiel (100 % HPS). L'évaluation économique n'a pas considéré le fait que les plants avec tapis chauffant étaient plus développés, ce qui normalement devrait affecter leur valeur commerciale; 5 % de la valeur commerciale peut représenter facilement un avantage plus important que l'économie sur le coût de l'énergie...

Il faut considérer que l'écart entre la zone de température « normale » et la zone « froide » n'a été en moyenne que de 0.95 °C, ce qui réduit théoriquement la demande de chauffage d'environ 3.2 % en février; si la réduction de la température ambiante résulte en une augmentation de la période de culture de plus de 3.2 %, on est donc perdant en plus d'avoir des plants qui vont être moins développés.

Pour analyser davantage les effets des tapis chauffants d'un point de vue agronomique et énergétique, il faudra évaluer à grande échelle son utilisation dans une chapelle avec une température de l'air ambiant normale versus une autre avec une température de l'air ambiant plus basse. Ceci pour une seule variété de plant et avec éclairage artificiel 100 % HPS seulement.

Nous croyons que le chauffage des serres au niveau du plancher ou encore directement au niveau racinaire, a un potentiel très intéressant d'un point de vue agronomique et énergétique. Cependant, il faudra évaluer les investissements qu'une entreprise devra effectuer pour profiter pleinement de ce type de chauffage en fonction de :

- Son plan d'affaires
 - Quel est son contexte de production?
 - Quel marché vise-t-il à court et moyen terme?
 - Est-ce que le producteur pourra effectuer plus de rotations ou encore débiter plus tard en saison?
 - Est-ce que la technique de production utilisée a un effet sur les revenus?
- La technologie choisie
 - Est-ce que le producteur choisira un système de chauffage de type hydrique ou par câblage électrique?
 - Quels seront les coûts d'immobilisation?
 - Quels seront les coûts d'opération?
 - Comment le producteur va-t-il gérer ce système?
 - Quels seront les effets d'une utilisation prolongée par le producteur sur des plants matures au niveau de la qualité et des rendements?
 - Quels seront les effets sur ses opérations quotidiennes?
 - Quels seront les pré-requis pour s'assurer une utilisation optimum de ce type de chauffage?
 - Comment le producteur va-t-il gérer les fluctuations rapides de température extérieure (une caractéristique du climat québécois) avec ce type de système?
 - S'il y a lieu, quel système de chauffage d'appoint devra-t-il choisir?

Comme vous le voyez, le tapis chauffant est intéressant, mais nous ne pouvons pas l'appliquer de façon automatique chez les producteurs. Une évaluation économique adéquate de l'utilisation d'une technologie et des procédés reliés à celle-ci, requiert l'évaluation des effets agronomiques et l'évaluation des effets sur l'utilisation des ressources.