



# **Impact d'un éclairage DEL intra-canopée sur la valeur nutritive de la tomate cultivée sous serre**

**Mémoire**

**Marie-Josée Breton**

**Maîtrise en biologie végétale**  
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Marie-Josée Breton, 2017

# **Impact d'un éclairage DEL intra-canopée sur la valeur nutritive de la tomate cultivée sous serre**

**Mémoire**

**Marie-Josée Breton**

Sous la direction de :

Martine Dorais, directrice de recherche  
Steeve Pepin, codirecteur de recherche

## RÉSUMÉ

Depuis quelques années, on observe une demande croissante pour des aliments sains, goûteux, produits localement et disponibles en toutes saisons. En raison de la localisation nordique du Québec, un apport supplémentaire de lumière pour les cultures en serre est souhaitable pour l'atteinte d'une productivité élevée et de qualité. Chez la tomate, il a été récemment observé que la modification du spectre de lumière près des fruits peut améliorer la valeur nutritive des fruits. Afin d'évaluer le potentiel d'utilisation d'un éclairage artificiel (ÉA) intra-canopée sur l'accroissement de la qualité de la tomate de serre cultivée au Québec au printemps / été et en automne / hiver, neuf traitements d'ÉA ont été étudiés : bleu / rouge, bleu / rouge + bleu + rouge lointain, bleu / rouge + rouge lointain + bleu + rouge lointain, UV ; positionnement horizontal et vertical des lampes ; témoin (blocs complets, 9 traitements x 2 cultures x 4 répétitions). Nos résultats ont démontré que l'utilisation d'un ÉA intra-canopée a permis d'augmenter significativement la biomasse fraîche (31 à 42 %) et sèche (34 à 50 %) des feuilles ainsi que la biomasse sèche des tiges (37 à 46 %). En comparaison des fruits témoins, le délai de maturation a été réduit sous un ÉA DEL de 3 à 7 jours alors que la masse fraîche des fruits a quant à elle été plus élevée de 30 à 42 % ( $P < 0,05$ ). Le contenu en sucre des fruits soumis à un ÉA DEL et UV a été accru de 9 à 12 %, alors que la conductivité électrique et l'acidité titrable des fruits exposés à un ÉA UV a augmenté respectivement de 13 % et de 24 % ( $P < 0,05$ ). Similairement, le contenu des fruits en vitamine C a augmenté de 17 à 22 % sous ÉA DEL par rapport aux fruits témoins, alors que l'acide coumarique-o-hexoside 2 a augmenté de 59 à 307 %. Une diminution de concentration par rapport aux fruits témoins ( $P < 0,05$ ) a toutefois été observée pour l'acide coumaroylquinique (36 à 51 %), la phlorétine-c-diglycoside (28 à 47 %) et le K (11 à 19 %). En général, le positionnement des lampes a eu peu d'effet sur la qualité des fruits alors que la saison de culture a influencé l'effet des traitements d'ÉA sur la qualité des fruits. Cette étude a permis d'acquérir de nouvelles connaissances scientifiques de l'effet d'un ÉA DEL sur la qualité des fruits, contribuant ainsi au développement d'une nouvelle stratégie d'ÉA adaptée à notre climat.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>iii</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b> .....	<b>x</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
1.1 La culture en serre.....	1
1.2 La tomate.....	1
1.3 L'éclairage artificiel (ÉA) .....	2
1.4 Les diodes électroluminescentes (DEL) .....	3
1.5 Coûts et impact environnemental .....	6
1.6 La problématique actuelle .....	7
<b>2. HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS</b> .....	<b>9</b>
<b>3. MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>11</b>
3.1 Description du projet et site expérimental .....	11
3.2 Dispositif expérimental .....	11
3.3 Conditions de culture et de fertilisation .....	13
3.4 Mesures des paramètres physiologiques .....	14
3.4.1 Croissance .....	14
3.4.2 Développement et rendement en fruits .....	15
3.4.3 Fluorescence chlorophyllienne et taux de chlorophylle.....	15
3.5 Maturité et qualités des fruits .....	16
3.5.1 Stade de maturité des fruits.....	16
3.5.2 Fermeté des fruits.....	16
3.6 Analyses organoleptiques et nutraceutiques des fruits .....	17
3.6.1 Analyses organoleptiques.....	17
3.6.2 Analyses nutraceutiques.....	18
3.7 Analyses Statistiques .....	21
<b>4. RÉSULTATS</b> .....	<b>23</b>
4.1 Croissance .....	23
4.1.1 Hebdomadaire .....	23
4.1.2 Biomasse .....	25
4.2 Développement et rendement .....	30
4.2.1 Durée de développement des fruits .....	30
4.2.2 Récolte.....	31
4.3 Qualité des fruits.....	34
4.3.1 Physico-chimie.....	34
4.3.2 Nutriments.....	38
<b>5. DISCUSSION</b> .....	<b>48</b>
5.1 Effets des traitements lumineux sur la croissance.....	48
5.1.1 Hebdomadaire .....	48

5.1.2 Biomasse .....	49
<b>5.2 Effets des traitements lumineux sur le rendement .....</b>	<b>50</b>
5.2.1 Délai de développement des fruits .....	50
<b>5.3 Effets des traitements lumineux sur la qualité des fruits.....</b>	<b>51</b>
5.3.1 Physico-chimie .....	51
5.3.2 Nutriments.....	53
<b>6. CONCLUSION .....</b>	<b>58</b>
<b>7. BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>60</b>
<b>Annexe 1 Description des traitements et caractérisation des lampes.....</b>	<b>65</b>
<b>Annexe 2 Mesures des conditions de culture et de récolte .....</b>	<b>68</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Effet de la lumière sur les composés gustatifs et nutraceutiques des fruits et légumes cultivés en serre (adapté de Dorais et al., 2017).....	6
<b>Tableau 2</b> : Estimation de l'utilisation d'énergie : lampes DEL (Orbital Technologies Inc., Madison, WI) et HPS, avec une efficacité de conversion lumineuse pour 1-ha de serres de concombres (Adapté de Hernandez et Kubota 2015).....	7
<b>Tableau 3</b> : Transitions MRM et paramètres MS optimisés utilisés pour l'analyse des composés phénoliques des tomates par UHPLC-MS.....	21
<b>Tableau 4</b> : Effets des traitements d'ÉA sur la croissance hebdomadaire des plantes cultivées en été et en automne. Les valeurs sont la moyenne de n = 80 (moyenne 2 UE (H et V) x 4 répétitions x 10 semaines). Aucun effet significatif n'a été observé pour l'élongation de la tige.....	23
<b>Tableau 5</b> : Valeurs P des effets observés pour les paramètres de croissance destructives (8 traitements x 2 cultures x 4 répétitions).....	28
<b>Tableau 6</b> : Biomasses moyennes des plantes (fruits, tiges, feuilles) soumises aux différents traitements d'ÉA (H = horizontal, V = vertical) au cours de deux périodes de culture (moyenne ; erreur type de la moyenne ; sèche n = 4 (1 plant/UE x 4 rép.) ; fraîche n = 8 (2 plant/UE x 4 rép.)). L'analyse combinée montre les différences significatives entre chacun des traitements d'ÉA-position et le témoin, alors qu'une analyse LSD protégée entre les 8 traitements d'ÉA montre la différence entre les traitements d'ÉA. Aucun effet position ou interaction traitement ÉA*position n'a été significatif. Pour chacun des traitements d'ÉA, les valeurs H et V ont donc été regroupées.....	29
<b>Tableau 7</b> : Nombre, masse et calibre moyen des fruits des trois grappes étudiées des plants soumis à différents traitements d'ÉA au cours de deux saisons de croissance. Les valeurs sont la moyenne des deux positionnements des lampes puisqu'aucun effet de position n'a été observé. Un test LSD protégé a été effectué pour chacune des cultures puisqu'une interaction significative ÉA*saison a été observée. Les lettres minuscules montrent les différences significatives entre les traitements ÉA pour la culture d'été alors que les lettres majuscules montrent les différences pour la culture d'automne.....	34
<b>Tableau 8</b> : Valeurs P observés pour les paramètres de physico-chimie mesurés sur les fruits pour chacune des deux saisons de culture.....	35
<b>Tableau 9</b> : Mesures physico-chimiques moyennes (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des fruits soumis aux différents traitements d'ÉA ; H = horizontal, V = vertical au cours de deux périodes de culture.....	37

**Tableau 10 :** Valeurs moyennes (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des paramètres de la qualité des fruits soumis à différents traitements d'ÉA au cours de deux saisons de croissance. Les valeurs sont la moyenne des deux positionnements des lampes puisqu'aucun effet de position n'a été observé, à l'exception de la fermeté. Un test LSD protégé a été effectué pour chacune des cultures puisqu'une interaction significative ÉA\*saison a été observée. Les lettres minuscules montrent les différences significatives entre les traitements ÉA pour la culture d'été alors que les lettres majuscules montrent les différences pour la culture d'automne.....37

**Tableau 11 :** Contenu moyen en caroténoïdes des fruits des trois grappes étudiées des plants (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) soumis aux différents traitements d'ÉA ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux périodes de culture (moyenne ; erreur type de la moyenne).....42

**Tableau 12 :** Contenu moyen en caroténoïdes des fruits des trois grappes étudiées (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des plants soumis à différents traitements d'ÉA au cours de deux saisons de culture. Les valeurs sont la moyenne des deux positionnements des lampes puisqu'aucun effet de position n'a été observé. Un test LSD protégé a été effectué pour chacune des cultures puisqu'une interaction significative ÉA\*saison a été observée. Les lettres minuscules montrent les différences significatives entre les traitements ÉA pour la culture d'été alors que les lettres majuscules montrent les différences pour la culture d'automne.....43

**Tableau 13 :** Contenu moyen en composés phénoliques des fruits des trois grappes étudiées (n = 12 ; 4 rép. x 3 grappes) soumis aux traitements d'ÉA (H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture.....44

**Tableau 14 :** Contenu moyen des composés phénoliques des fruits des trois grappes étudiées (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des plants soumis à différents traitements d'ÉA au cours de deux saisons de croissance. Les valeurs sont la moyenne des deux positionnements des lampes puisqu'aucun effet de position n'a été observé, à l'exception de l'acide coumaroylquinique et des phénols totaux. Un test LSD protégé a été effectué pour chacune des cultures puisqu'une interaction significative ÉA\*saison a été observée. Les lettres minuscules montrent les différences significatives entre les traitements ÉA pour la culture d'été alors que les lettres majuscules montrent les différences pour la culture d'automne.....45

**Tableau 15 :** Contenu moyen en minéraux des fruits des trois grappes étudiées (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des plants soumis aux différents traitement d'ÉA ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux périodes de production (moyenne ; erreur type de la moyenne).....46

**Tableau 16 :** Contenu moyen en minéraux des fruits trois grappes étudiées (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des plants soumis à différents traitements d'ÉA au cours de deux saisons de croissance. Les valeurs sont la moyenne des deux positionnements des lampes puisqu'aucun effet de position n'a été observé. Un test LSD protégé a été effectué pour chacune des cultures puisqu'une interaction significative ÉA\*saison a été observée. Les lettres minuscules montrent les différences significatives entre les traitements ÉA pour la culture d'été alors que les lettres majuscules montrent les différences pour la culture d'automne.....47

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1 :** Rendement en tomates lors de quatre expérimentations différentes pendant 5 mois consécutifs, comparant un ÉA HPS (600W) et DEL à un éclairage naturel (1 et 3 = hiver à été ; 2 et 4 = été à hiver) (Gomez et Mitchell, 2015. West Lafayette, IN, USA).....**3**
- Figure 2 :** Rendement cumulatif total (moyenne  $\pm$  SE) en fruit par plant sous éclairage DEL intra-canopée (n = 3) (Pepin et al., 2014).....**5**
- Figure 3 :** Cumul mensuel de PPFd mesuré au-dessus d'une serre durant l'automne 2012 et l'été 2013 à l'université Laval, Québec (Pepin et al., 2014).....**8**
- Figure 4 :** Photos du dispositif expérimental (panneaux et toiles), printemps/été 2015.....**12**
- Figure 5 :** Plan du dispositif expérimental établi dans une serre de 150 m<sup>2</sup> du complexe de serres de haute performance de l'Université Laval (Québec, Qc).....**13**
- Figure 6 :** Histogramme représentant l'élongation hebdomadaire moyenne des plantes selon le traitement d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) et selon la saison de culture (été, automne), n = 40 (1 plant/UE x 4 répétitions x 10 semaines). Un effet significatif a été observé entre les périodes de cultures (P = 0,0202) et entre les traitements d'ÉA (P = 0,0039).....**24**
- Figure 7 :** Histogramme représentant le diamètre hebdomadaire moyen des tiges selon le traitement d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) et selon la saison de culture (été, automne), n = 40 (1 plant/UE x 4 répétitions x 10 semaines). Un effet significatif a été observé entre les périodes de cultures (P < 0,0001) et les traitements d'ÉA (P < 0,0001).....**24**
- Figure 8 :** Histogramme représentant la longueur hebdomadaire moyenne des feuilles selon le traitement d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) et selon la saison de culture (été, automne), n = 40 (1 plant/UE x 4 répétitions x 10 semaines). Un effet significatif a été observé entre les périodes de culture (P < 0,0001) et les traitements d'ÉA (P < 0,0001).....**25**
- Figure 9 :** Histogramme représentant le nombre de jours moyen entre la nouaison et la récolte du fruit selon le traitement d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) et la saison de culture (été ; automne), été n = 120 (5 fruits/grappe x 3 grappes x 2 plants/UE x 4 répétitions), automne n = 96 (4 fruits/grappe x 3 grappes x 2 plants/UE x 4 répétitions).....**31**
- Figure 11 :** Histogramme représentant le nombre total de fruits récoltés sur les trois grappes étudiées des plants soumis aux traitements d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne), n = 8 (2 plants/ UE x 4 répétitions). Un effet significatif entre les deux saisons (P = 0,0024) et entre les traitements d'ÉA au cours de l'été (P = 0,0358) ont été observés.....**32**

**Figure 12 :** Histogramme représentant le total de la masse moyenne (g) des fruits pour les trois grappes étudiées des plants soumis aux traitements d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne), n = 8 (2 plants/UE x 4 répétitions). Une différence significative entre les saisons de culture (P = 0,0109) et les traitements d'ÉA au cours de l'été (P = 0,0011) ont été observés.....**33**

**Figure 13 :** Histogramme représentant le calibre moyen (g) des fruits sur les grappes étudiées des plants soumis aux traitements d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne), n = 96 (2 plants/UE x 4 répétitions x 12 semaines). Un effet significatif des traitements d'ÉA a été observé au cours de l'été (P = 0,072).....**33**

**Figure 14 :** Histogramme représentant le contenu moyen en caroténoïdes totales ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) des fruits des trois grappes étudiées des plants soumis aux traitement d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne), n = 12 (4 répétitions x 3 grappes).....**39**

**Figure 15 :** Histogramme représentant le contenu moyen en vitamine C ( $\text{mg g}^{-1}$ ) des fruits des trois grappes étudiées des plants soumis aux traitements d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne), n = 12 (4 répétitions x 3 grappes).....**39**

**Figure 16 :** Histogramme représentant le contenu moyen des Phénols totaux ( $\text{mg g}^{-1}$ ) des fruits des trois grappes étudiées des plants soumis aux traitements d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne), n = 12 (4 répétitions x 3 grappes).....**40**

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>AT</b>	Acidité titrable
<b>B</b>	Bleu
<b>β</b>	Bêta
<b>Ca</b>	Calcium
<b>CE</b>	Conductivité électrique
<b>cm</b>	Centimètre
<b>Cu</b>	Cuivre
<b>DEL</b>	Diode électroluminescente
<b>DFPP</b>	Densité de flux de photons utiles à photosynthèse
<b>DPV</b>	Déficit de pression de vapeur
<b>ÉA</b>	Éclairage artificiel
<b>ETM</b>	Erreur type de la moyenne
<b>Fe</b>	Fer
<b>g</b>	Gramme
<b>h</b>	Heure
<b>H</b>	Horizontal
<b>ha</b>	Hectares
<b>HPLC</b>	Chromatographie liquide à haute performance
<b>HPS</b>	Sodium à haute pression
<b>ICL</b>	Éclairage intra-canopée
<b>K</b>	Potassium
<b>kPa</b>	Kilo pascal
<b>kV</b>	Kilovolt
<b>L</b>	Litre
<b>m<sup>2</sup></b>	Mètre carré
<b>mbar</b>	Millibar
<b>meq</b>	Milliéquivalent
<b>m.f.</b>	Masse fraîche
<b>Mn</b>	Manganèse
<b>mm</b>	Millimètre
<b>mol</b>	Mole
<b>mQ</b>	Milli-Q
<b>m.s.</b>	Masse sèche
<b>N</b>	Azote
<b>NaOH</b>	Hydroxyde de sodium
<b>P</b>	Potassium
<b>PAR</b>	Rayonnement photosynthétique actif
<b>pH</b>	Potentiel hydrogène
<b>PPFD</b>	Densité de flux de photons utiles à la photosynthèse
<b>R</b>	Rouge
<b>RL</b>	Rouge lointain
<b>rpm</b>	Rotation par minute
<b>SS</b>	Solides solubles

<b>Trt</b>	Traitement
<b>UE</b>	Unité expérimentale
<b><math>\mu\text{mol J}^{-1}</math></b>	Micromole/jour
<b><math>\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}</math></b>	Micromole/mètre carré/seconde
<b><math>\mu\text{l}</math></b>	Microlitre
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	Micromètre
<b>UPLC</b>	Chromatographie liquide ultra performante
<b>UV-B</b>	Ultraviolet B
<b>V</b>	Vertical
<b>V</b>	Volt
<b>W</b>	Watt
<b>Zn</b>	Zinc
<b>°C</b>	Degré Celsius
<b>~</b>	Approximation
<b>%</b>	Pourcent
<b>&lt;</b>	Inférieur à
<b>≤</b>	Inférieur ou égal
<b>&gt;</b>	Supérieur à
<b>=</b>	Égal

## REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier les trois amours de ma vie, Sébastien, Ilane et Barthélémy, qui m'ont encouragé et permis de me lancer dans cette aventure loin d'eux et de la Gaspésie.

J'aimerais aussi remercier ma directrice Martine Dorais qui m'a permis de travailler sur ce projet, ainsi que mon co-directeur Steeve Pepin pour son aide technique, ses conseils et sa disponibilité.

Toute ma reconnaissance à Réjean Bacon, sans qui ce projet n'aurait pas été le même. Un gros merci aux auxiliaires et plus particulièrement Béatrice Dion, Jérôme Ouellet, Sabrina Fournel, Marie-Pier Perron et Félix-Antoine Lebœuf. Merci également à Carole Martinez pour ses précieux conseils agronomiques et Mireille Thériault qui m'a aidé à me dépatouiller plus d'une fois. Merci à Nicolas Pelletier et tout le personnel des serres, Pascal Dubé et Véronique Richard de L'INAF, Pascal Lavoie (FSAA), Gaston Mercier (AAC) et Aurélien Nicosia pour les statistiques. Mais aussi à Béatrice Perron, François Gagnon et Johanne Méthot pour leurs aides et conseils à différentes reprises

Merci au MAPAQ par le biais du programme Innov'Action ainsi que Karine Pedneault du Centre de Développement Bioalimentaire du Québec (CDBQ) pour leurs contributions financières.

# 1. INTRODUCTION

## 1.1 La culture en serre

La culture en serre permet de contrôler les différentes conditions de culture des plantes, à savoir la température, l'humidité et la lumière ; elle permet donc, dans une certaine mesure, de ne plus être dépendant de la météo. Seulement au Canada, ce type de culture représentait en 2015 une valeur à la ferme de plus de 1,3 milliards de dollars, avec un taux de croissance annuel des productions légumières de 5,5 %, dont la tomate qui comptait pour 40 % de la valeur à la ferme globale des légumes de serre (Wang, 2015). L'Ontario possède 69 % de la superficie globale récoltée de légumes en serre au Pays, la Colombie-Britannique 20 % et le Québec 7 % (Wang, 2015). Cette façon de faire est particulièrement intéressante pour un pays comme le Canada, puisque l'agriculture à l'extérieur n'est possible que quelques mois par année, à l'exception de la Colombie-Britannique où la température est plus clémente. De plus, ce système de production peut contribuer à accroître de façon importante le goût et la valeur nutritive des fruits en offrant un environnement modulable au cours de la saison (Dorais et al., 2001 ; Labrie et Verkerke, 2014). Cela permet ainsi l'obtention en tout temps de fruits d'une très grande qualité, pouvant être standardisés en termes de valeur nutritive.

## 1.2 La tomate

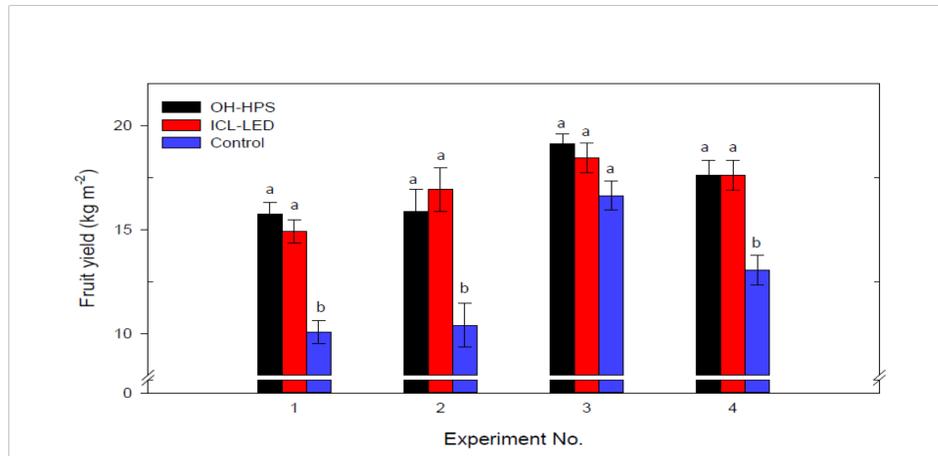
Dans cette étude, la tomate a été utilisée en raison de son importance économique au sein de l'industrie québécoise, de sa valeur nutritive et des connaissances scientifiques reliées à cette espèce. Elle a longtemps été offerte uniquement durant la saison estivale, mais grâce à l'arrivée de la culture des tomates en serre dans les années 80, il est maintenant possible de se procurer des fruits frais, savoureux et riches sur le plan nutritif tout au long de l'année (Turcotte et al., 2015).

Les principaux composés de la tomate ayant un effet bénéfique pour la santé humaine sont les caroténoïdes (lycopène,  $\beta$ -carotène, lutéine), la vitamine C et les composés phénoliques (flavonoïdes : quercétine, kaempférol, rutine, naringénine, chalcone ; acides hydroxycinnamiques : caféique, férulique, p-coumarique, chlorogénique) ainsi que les fibres

et les minéraux (Dorais et al., 2008). Les principaux minéraux qui entrent dans la constitution de la tomate sont le calcium, le magnésium, le fer, le phosphore, le potassium et le sodium (Turcotte et al., 2015). Finalement, la qualité gustative des fruits quant à elle, se définit principalement par l'équilibre entre sa teneur en sucres (glucose, fructose), en acides organiques (citrique et malique) et en flaveurs (Dorais et al., 2001).

### 1.3 L'éclairage artificiel (ÉA)

En raison de notre climat nordique, un apport supplémentaire de lumière est toutefois essentiel à l'atteinte d'une productivité hivernale rentable et de qualité. Il a été démontré que sous des conditions de faible intensité lumineuse naturelle, telle qu'observée au Canada durant la période hivernale, l'ÉA assure un rendement acceptable et accroît la qualité des légumes produits en serre (Dorais et al., 2006 ; Heuvelink et al., 2006). La disponibilité de la tomate québécoise hors saison, est ainsi possible grâce à la technologie de l'éclairage photosynthétique (PAR 400-700 nm) qui prend la relève des rayons solaires durant la saison froide. Sous un environnement naturel et à l'intérieur d'une canopée végétale, les plantes sont constamment soumises à des conditions lumineuses variables qui modulent leur capacité photosynthétique et leur métabolisme (p. ex. pigments, photosystèmes, expression des gènes, activités enzymatiques). La lumière agit donc comme un signal environnemental qui interagit avec les signaux endogènes telles les phytohormones (p. ex. auxine, gibbérelline) induisant ainsi des réponses morphologiques et métaboliques (Folta et Childers, 2008). Comme on peut le constater à la Figure 1, pour les cultivars « Komeet » et « Succes » greffés sur « Maxifort » (*Solanum lycopersicum* x *S. habrochaites*) lors de quatre expérimentations différentes, la supplémentation de la lumière avec un éclairage HPS (sodium à haute pression) au-dessus de la canopée (colonnes noires) ou DEL (diode électroluminescente) intra-canopée (colonnes rouges), a permis d'obtenir un rendement supérieur d'au moins 33 % comparativement à un éclairage naturel (colonnes bleues) (Gomez et Mitchell, 2015).



**Figure 1 :** Rendement en tomates lors de quatre expérimentations différentes pendant 5 mois consécutifs, comparant un ÉA HPS (600W) et DEL à un éclairage naturel (1 et 3 = hiver à été ; 2 et 4 = été à hiver) (Gomez et Mitchell, 2015. West Lafayette, IN, USA).

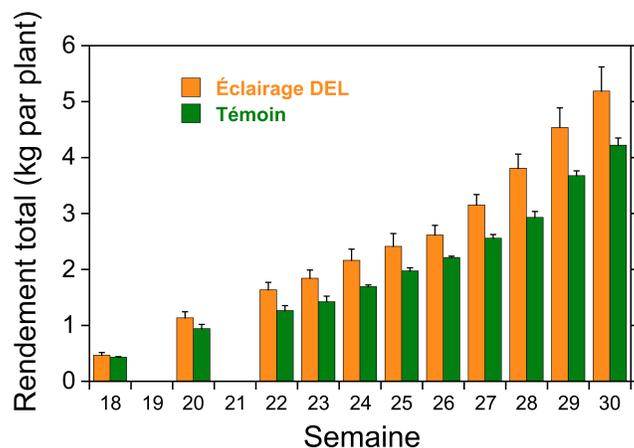
Il a aussi été démontré qu’une hausse de l’intensité lumineuse près des fruits, suite à l’utilisation d’un ÉA, permet d’augmenter leur teneur en composés bénéfiques pour la santé (vitamine C, lycopène,  $\beta$ -carotène et phénols), ainsi que leur contenu en composés organoleptiques (sucres solubles, acides organiques, arômes et minéraux) (Dorais et al., 2008 ; Gautier et al., 2005). L’utilisation de la lumière afin d’améliorer la qualité des fruits constitue donc une approche innovante et prometteuse pour les producteurs.

#### 1.4 Les diodes électroluminescentes (DEL)

Les lampes à diodes électroluminescentes représentent une avancée technologique prometteuse pour la culture en serre (Pepin et al., 2014 ; Olle et Virsilé, 2013). Ces systèmes permettent de produire un éclairage de bonne intensité tout en dégageant peu de chaleur, permettant ainsi un usage intra-canopée (Olle et Virsilé, 2013). De plus ce type d’ÉA permet de moduler l’intensité et la qualité de la lumière (variations diurnes), car elles ont un spectre lumineux spécifique (Olle et Virsilé, 2013). En effet, ces systèmes d’ÉA permettent de contrôler la composition spectrale de la lumière de façon à l’adapter aux photorécepteurs des plantes (cryptochromes, phytochromes, phototropines) et ainsi optimiser la culture en agissant sur leur morpho-physiologie et composition photochimique (Dorais et al., 2008 ; Devlin et al., 2007 ; Folta et Childers, 2008 ; Hogewoning et al., 2012). Des études récentes ont établi qu’en plus d’améliorer l’efficacité d’utilisation de la lumière, la croissance et le

rendement des légumes de serre, un ÉA avec des DEL peut augmenter les composés bénéfiques pour la santé humaine tels l'acide ascorbique et les composés phénoliques (Azuma et al., 2012).

Selon la littérature scientifique, les plantes réagissent de façon spécifique aux différentes longueurs d'ondes lumineuses (Olle et Virsilé, 2013). Ainsi, la lumière bleue est reconnue pour stimuler l'ouverture des stomates et accroître le taux de photosynthèse chez certaines espèces tel le concombre et augmenter également la biomasse des plantes et la croissance des fruits chez la tomate (Ménard et al., 2006). Les DEL rouges sont efficaces pour l'amélioration du rendement (12 %) de la culture de tomates (Lu et al., 2012), et l'addition de rouge lointain chez le poivron a résulté en des plantes de taille plus grande, avec une masse de tiges plus élevée par rapport aux DEL rouges seulement (Brown et al., 1995). De plus, une étude menée par Lee et al. (2014), a reporté que la supplémentation en DEL rouges et bleues a permis de récolter des fruits 17 jours plus tôt et d'accroître le rendement hâtif de 2,6 fois comparativement à une culture où il n'y avait pas d'éclairage artificiel; le rendement total n'ayant toutefois pas été affecté. Par contre, une étude menée à l'Université Laval a démontré que l'utilisation d'un éclairage DEL intra-canopée a permis d'accroître la productivité de la tomate de 24 % tout en augmentant la teneur de certains composés des fruits tels que des composés phénoliques (Figure 2; Pepin et al., 2014). Une augmentation de la productivité de l'ordre de 22 à 31 % a également été observé par Kumar et al. (2016).



**Figure 2** : Rendement cumulé total (moyenne  $\pm$  SE) en fruit par plant sous éclairage DEL intra-canopée (n = 3) (Pepin et al., 2014).

En ce qui concerne les phytonutriments, la biosynthèse des caroténoïdes est modulée par l'effet régulateur des phytochromes et stimulée par la lumière rouge et rouge lointain, à l'exception du lycopène dont la production est inhibée par le rouge lointain (Schofield et Paliyath, 2005 ; Alba et al., 2000). Les photorécepteurs du phytochrome sont aussi connus pour moduler plusieurs réponses de défense des plantes, pouvant être directement ou indirectement reliées aux molécules bioactives tels les flavonoïdes (Brandt, 1995). La teneur en vitamine C et en sucres solubles quant à elle, augmente avec la durée d'exposition à une lumière infrarouge, alors qu'une augmentation de la lumière bleue durant le mûrissement des fruits s'accompagne d'une teneur plus élevée en lycopène et en  $\beta$ -carotène (Gautier et al., 2005). La lumière bleue augmente aussi la teneur en vitamine C chez certaines plantes comme le brocoli et le poivron (Lester, 2006), en anthocyane chez la tomate (Giliberto et al., 2005) et en caroténoïdes chez la laitue (Li et Kubota, 2009). Les UV augmentent le contenu en composés phénoliques (Dorais et al, 2016 ; Wargent, 2016), et ce entre autres par l'intermédiaire du photorécepteur UVR8 (Huché-Thélier et al., 2016). Le Tableau 1 présente une synthèse de l'intensité et de la qualité lumineuse sur les fruits cultivés en serre.

**Tableau 1 :** Effet de la lumière sur les composés gustatifs et nutraceutiques des fruits et légumes cultivés en serre (adapté de Dorais et al., 2017).

	FPP	UV	B	V	R	RL
Sucres solubles	↑					
Acides organiques	↑					
Arômes	↑					
NO <sub>3</sub>				↓	↓*	
Chlorophylle			↑	↑		↓
Caroténoïdes	↑	↑	↑		↑	↓
Lycopène	↑		↑		↑	↓
β-carotène	↑	↓	↑			
Lutéine			↑		↑	
Vitamines						
C	↑	↓↑ <sup>τ</sup>	↑	↑	↑*	↑
E				↑	↑	
Flavonoïdes		↑ <sup>τ</sup>				
Composés phénoliques	↑	↑	↑	↑	↑	
Pelargonidine				↑		
Antocyanines	↑	↑	↑	↑		↓
Activité antioxydante		↑ <sup>τ</sup>	↑	↑	↑	↓

↑ augmentation du contenu, ↓ réduction du contenu, \*dépendamment des espèces, <sup>τ</sup>dépendamment de la dose et du temps d'exposition

### 1.5 Coûts et impact environnemental

En plus d'être économique énergétiquement, les impacts environnementaux des DEL se doivent d'être mentionnés. En effet, elles ouvrent des perspectives intéressantes en matière d'éclairage durable, car elles sont caractérisées par une longue durée de vie (jusqu'à 50 000 h) supérieure aux HPS (10 000 à 17 000 h) (Nelson et Bugbee, 2014), et d'un bon rendement énergétique. Comme on peut le voir dans le Tableau 2, la différence dans l'efficacité de conversion de l'énergie électrique en énergie utile pour la plante est plus élevée pour les DEL comparativement aux HPS. Soit de 1,9 pour le bleu par rapport à 1,6  $\mu\text{mol J}^{-1}$  pour une HPS, ce qui représente environ 18 % d'amélioration et de 6 % pour le rouge à 1,7  $\mu\text{mol J}^{-1}$  (Hernandez et Kubota, 2015). Par contre, selon Bugbee (2016), l'efficacité entre les DEL et HPS était sensiblement la même, soit de 1,66 à 1,70  $\mu\text{mol J}^{-1}$ . L'efficacité énergétique semble cependant continuer à s'améliorer avec le temps et au fil des recherches sur le sujet.

**Tableau 2 :** Estimation de l'utilisation d'énergie : lampes DEL (Orbital Technologies Inc., Madison, WI) et HPS, avec une efficacité de conversion lumineuse pour 1-ha de serres de concombres (Adapté de Hernandez et Kubota 2015).

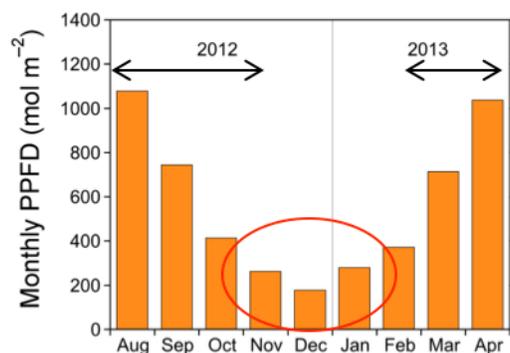
Type de lampe	Efficacité des Photons (% du total)	Efficacité de conversion PAR ( $\mu\text{mol j}^{-1}$ )	Capacité de consommation par section ( $\text{Wm}^{-2}$ )	Efficacité de l'installation sur la croissance ( $\text{g kWh}^{-1}$ )
DEL rouge	85 %	1,7	39	3,0
DEL bleu	85 %	1,9	35	3,3
HPS 600 W	81 %	1,6	43	3,5

Selon Gomez et Mitchell (2014), il serait possible de faire une économie énergétique de 55 à 75 % pour un traitement lumineux DEL-intracanéopé versus un traitement traditionnel HPS au-dessus de la culture, tout en maintenant un rendement en fruits comparable. Et en ce qui a trait aux coûts reliés à la réduction de la consommation d'électricité, il est plus efficace d'utiliser une lampe DEL (80 W) comparativement à une HPS (200 W) pour la culture de tomates, selon une étude menée en Corée (Lee et al., 2014). De plus, il n'y a pas d'enveloppe fragile à briser (bulbe), pas de chaleur élevée au touché et les DEL ne contiennent pas de matériaux dangereux comme le mercure (Olle et Virsilé, 2013). Les petits formats permettent des montages versatiles d'unités lumineuses et les systèmes peuvent être configurés pour émettre à des flux lumineux élevés, qui même à très hautes intensités, peuvent être placés près des plants, car ils émettent peu de chaleur (Olle et Virsilé, 2013).

### 1.6 La problématique actuelle

On observe depuis quelques années une demande croissante chez les consommateurs pour des aliments sains, goûteux, disponibles en toutes saisons et produits localement. Ces changements deviennent des enjeux très importants pour les producteurs et détaillants d'une région à localisation nordique comme le Québec. Pour cette raison, un apport supplémentaire de lumière est essentiel à l'atteinte d'une productivité rentable et de qualité. En condition de faible intensité lumineuse tel qu'au Canada pendant certaines périodes de l'année, comme il

est possible de le constater sur la Figure 3 pendant les mois d'hiver, il a été démontré qu'un ÉA augmente le rendement et la qualité des fruits produits en serre (Hernández et Kubota, 2015 ; Dorais et al., 2016).



**Figure 3 :** Cumul mensuel de PPFD mesuré au-dessus d'une serre durant l'automne 2012 et l'été 2013 à l'université Laval, Québec (Pepin et al., 2014).

Bien que les DEL soient possiblement la plus grande avancée dans le domaine de l'ÉA destiné aux serres depuis ~15 ans (Massa et al., 2008 ; Morrow, 2008), l'effet de certaines longueurs d'onde et de leur modulation diurne sur la qualité nutritive et organoleptique des fruits et légumes demeure peu connu sous les conditions de croissance du Québec. Comparativement aux autres sources d'éclairage artificiel, comme les lampes à haute pression de vapeur de sodium (HPS) et les fluorescents, les DEL demandent un investissement plus élevé pour leur acquisition. Il a été calculé qu'une installation en DEL coûtait de cinq à dix fois plus qu'une installation en HPS par photon libéré, ce qui constitue présentement un frein à leur adoption (Bugbee, 2016). Toutefois, il est possible de bonifier la valeur nutritive des fruits et légumes grâce à un éclairage DEL localisé, mais peu d'études ont examiné l'effet de l'utilisation d'un spectre visible et rouge lointain pour cette amélioration (Li et Kubota, 2009).

Suite à ces travaux, cette étude consistait à vérifier l'effet de différents traitements d'ÉA DEL, installés à l'intérieur d'un couvert végétal, sur la valeur nutritive et organoleptique des fruits de la tomate (*Solanum lycopersicum* L. cv. Trust), et également sur la croissance et le développement des plantes.

## **2. HYPOTHÈSES**

- 1) Les fruits exposés à un ÉA DEL/UV positionné à l'intérieur de la canopée végétale ont une qualité et une valeur nutraceutique plus élevées que les fruits exposés à un ÉA HPS conventionnel (au-dessus des plantes).
- 2) Le contenu des fruits en composés bénéfiques pour la santé humaine varie en fonction de la qualité spectrale de l'ÉA, la lumière UV ayant un impact plus important qu'un ÉA rouge et bleu.
- 3) Le positionnement des lampes affecte la réponse des fruits à un ÉA DEL/UV, les plantes exposées à un ÉA plus important (positionnement vertical des lampes) bénéficiant davantage d'un ÉA DEL/UV que les fruits produits sous un ÉA horizontal.
- 4) La période de production (été vs automne) affecte la réponse des fruits à un ÉA DEL/UV, les fruits produits en automne bénéficiant davantage d'un ÉA DEL/UV que les fruits produits en été.

## **OBJECTIFS**

Général :

Accroître la valeur nutritive et gustative de la tomate par l'utilisation d'un ÉA de composition spectrale spécifique à l'intérieur du couvert végétal.

Spécifiques :

- 1) Comparer les effets de pulses de lumière UV et de trois traitements d'ÉA DEL de composition spectrale spécifique à un ÉA HPS conventionnel (témoin) sur la croissance des plantes et la qualité nutritive des fruits.

2) Comparer les effets de positionnement des lampes UV et DEL (vertical vs horizontal) sur la croissance des plantes et la qualité des fruits.

3) Évaluer pour deux saisons de croissance (été vs automne) l'effet de pulses de lumière UV et de trois traitements d'ÉA DEL de composition spectrale spécifique sur la croissance des plantes et la qualité nutritive des fruits.

### 3. MÉTHODOLOGIE

#### 3.1 Description du projet et site expérimental

Cette étude était composée de deux périodes expérimentales, la première effectuée sous un éclairage naturel élevé de mai à août 2015, et la seconde effectuée sous un éclairage naturel faible de septembre 2015 à janvier 2016. Le projet s'est déroulé dans une serre expérimentale de 150 m<sup>2</sup> du complexe de serres haute performance de l'Université Laval (Québec, QC) ; latitude 46.78 N, longitude 71.48 O.

#### 3.2 Dispositif expérimental

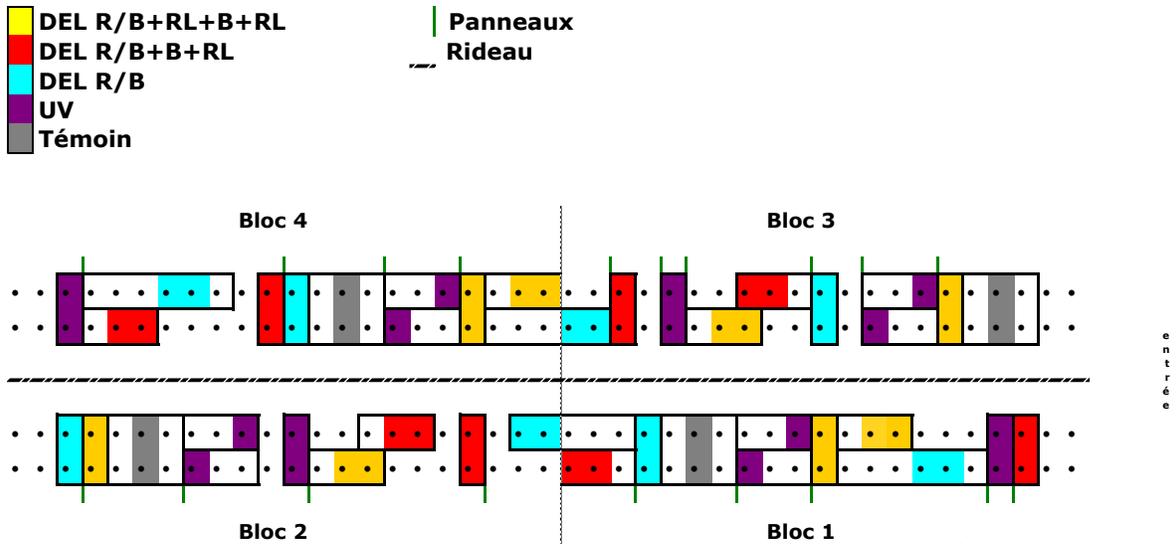
Le dispositif expérimental était un plan factoriel en blocs aléatoires complets comprenant quatre répétitions, où ont été comparés cinq traitements lumineux (incluant un traitement témoin sans ÉA) ainsi que deux traitements de positionnement des luminaires (installation verticale *vs* horizontale), totalisant 9 traitements et 36 unités expérimentales. Chaque unité expérimentale était constituée de deux plantes. Les traitements lumineux à l'intérieur de la canopée végétale étaient : **1**) témoin sans ÉA, **2**) pulses nocturnes de lumière UV (été = 6,6 kJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup> ; automne = 1,6 kJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>), **3**) ÉA DEL bleu (B, 460 nm ; 10 %) / rouge (R, 660 nm ; 90 %), **4**) ÉA DEL B/R avec enrichissement en B (460 nm) et en rouge lointain (RL, 740 nm) pour un flux total de 12,2 % B, 70 % R et 17,7 % RL, et **5**) ÉA DEL B/R + B + RL et 2 heures additionnelles de RL durant la nuit (flux total de 12 % B, 68 % R et 20 % RL) (Figure 5 et Annexe 1). Les luminaires utilisés pour les essais étaient : ÉA DEL (Philips interlighting module 220 V, Philips production module far-red 150 cm module 220 V, LED string blue 20 m 220 V et LED Power drive 60 W 220 V) et UV (G15T8E 15 W Germicidal UV-B Fluorescent Lamp). La durée d'ÉA des traitements a été ajustée afin que tous les traitements aient un cumul quotidien de lumière de ~13 mol m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>. Des toiles plastifiées opaques blanches ont été installées sur les murs, dans le but de limiter la lumière parasite en provenance des serres adjacentes et un rideau de plastique gris opaque passait au centre du dispositif pour séparer les blocs 1-2 des blocs 3-4. De plus, des panneaux de plastique blanc (Coroplast<sup>TM</sup>) et des plants de gardes étaient distribués entre les traitements afin d'éviter toute

contamination lumineuse (Figures 4 et 5).



**Figure 4** : Photos du dispositif expérimental (panneaux et toiles), printemps/été 2015.

La qualité spectrale provenant des lampes a été caractérisée à l'aide de spectromètres (DEL : USB4000 d'Ocean Optics, avec une fibre optique de 400 microns et un correcteur cosinus ; UV : QE65 Pro d'Ocean Optics, Dunedin, FL, USA) (Annexe 1).



**Figure 5** : Plan du dispositif expérimental établi dans une serre de 150 m<sup>2</sup> du complexe de serres de haute performance de l'Université Laval (Québec, Qc).

### 3.3 Conditions de culture et de fertilisation

Des graines de tomate (*Solanum lycopersicum*) du cultivar Trust ont été semées (été = 2 mars 2015 ; automne = 3 août 2015) dans des petits cubes de laine de roche puis couvertes de vermiculite. Ceux-ci ont par la suite été transplantés dans des blocs de fibres de coco (Millenniumsoils Coir™, une division de Vgrove inc., Ste-Catharines, Ontario, Canada) puis sur des pains de fibres de coco (100 x 15 x 12, 18 L, Eco Millenniumsoils Coir™), dès l'apparition de la première grappe (été = 23 avril 2015 ; automne = 17 septembre 2015), à environ 37 cm de distance (2 plants par pain). Les plantes ont été fertilisées selon une régie commerciale conventionnelle (OMAFRA, 2010). La serre a été maintenue sous éclairage naturel lors du premier essai, et pour le 2<sup>ième</sup>, un éclairage d'appoint (lampes HPS) installé à 386 cm du sol et de 120  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a été utilisé lorsque le PPFD était inférieur à 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , pour un maximum de 16 h/jour. L'irrigation et la température ont été ajustées en fonction de la vigueur des plantes et du stade de développement. La température de jour a été en moyenne de 24 °C, celle de nuit 20 °C (Annexe 2, Figure A.1) et le déficit de pression de vapeur (DPV) a été maintenu entre 6 et 15 mbar (Annexe 2, Figure A.2). Le tout a été contrôlé à l'aide du Système PRIVA™, enregistrant quotidiennement un rapport des données climatiques de la serre et permettant ainsi d'ajuster les paramètres au besoin. La pollinisation

a été assurée par une ruche de bourdons, avec un renouvellement de celle-ci aux 7 à 8 semaines.

### 3.4 Mesures des paramètres physiologiques

#### *3.4.1 Croissance*

Afin de suivre la progression de la croissance des plantes et d'ajuster les conditions de la culture selon leur développement, des mesures de croissance non destructives ont été prises hebdomadairement lors des deux essais, selon la méthode Tom'Pousse (Lambert et al., 2003) (été = 1 mai - 8 juillet ; automne = 24 septembre - 2 décembre 2015). Ainsi, la croissance de l'apex, le diamètre des tiges et la longueur des feuilles ont été mesurés sur une plante par unité expérimentale. Brièvement, l'élongation hebdomadaire de la tige était obtenue en mesurant la distance entre l'apex et la marque laissée la semaine précédente sur la corde de soutien et correspondant au point de croissance, elle se prenait au millimètre près au moyen d'un ruban à mesurer. Le diamètre de la tige était mesuré aussi au point de croissance de la semaine précédente, au moyen d'un vernier, ce qui représentait alors la vigueur de la plante. La feuille mature quant à elle, correspondait à la feuille se situant immédiatement en dessous de la grappe ayant au moins un fruit noué. Sa longueur était prise à l'aide d'un ruban à mesurer de la pointe de la feuille jusqu'au bout du pétiole attaché à la tige principale, et nous permettant d'évaluer l'équilibre (reproductif ou végétatif) des plantes.

À la fin de chacune des expérimentations, des mesures de croissance destructives ont été prises, soit le 12 août 2015 et le 5 janvier 2016. Les paramètres mesurés incluaient la surface foliaire totale de la plante, le nombre de fruits, la masse fraîche et sèche des feuilles, des fruits et de la tige ainsi que la longueur de la tige et le nombre d'entre-nœuds. La surface foliaire a été mesurée à l'aide d'un planimètre (LI-3100C, LiCor, Nebraska, É.U.) et la longueur de la tige et des entre-nœuds fut prise à l'aide d'un ruban à mesurer. La biomasse fraîche des fruits, feuilles et tiges de chacune des plantes a été mesurée, placée dans des sacs en papier et séchée à 60 °C dans une étuve ventilée pendant une semaine (feuilles et tiges) à trois semaines (fruits), puis leur masse sèche fut mesurée.

Durant les deux saisons de croissance, les plantes ont été effeuillées à des fins d'entretien à deux reprises, du bas des plantes à la 1<sup>ère</sup> grappe et de la 1<sup>ère</sup> grappe à la 2<sup>ème</sup> grappe. La biomasse fraîche et sèche des feuilles coupées a été pesée ainsi que la masse des fruits matures récoltés. Cette biomasse en feuilles et en fruits a été compilée et cumulée à la biomasse des mesures destructives afin d'obtenir la biomasse totale par plante. Il est à noter que toutes les mesures sèches n'ont été prises que sur les plantes où les mesures Tom'Pousse ont été prises, ainsi que la surface foliaire et la longueur des entre-nœuds, soit sur une plante/unité expérimentale. Pour la deuxième plante, seul les masses fraîches des fruits, feuilles et tiges ont été mesurées.

#### *3.4.2 Développement et rendement en fruits*

Trois grappes par plante et situées à hauteur des traitements lumineux horizontaux, ont été choisies pour faire les analyses organoleptiques et nutraceutiques, soit les grappes 2, 3 et 4 pour la culture d'été 2015, et les grappes 1, 2 et 3 pour celle de la culture d'automne. Le développement des plantes a été évalué par le nombre de fleurs nouées, la vitesse de nouaison et le rendement en fruits (méthode Tom'Pousse). Chacun des fruits des grappes choisies, était identifié lors de sa nouaison, à l'aide d'une étiquette sur laquelle on retrouvait d'un côté le numéro de la plante, et de l'autre côté le numéro du fruit (en ordre croissant selon sa date de nouaison), la grappe sur laquelle il se trouvait, et son rang dans celle-ci (1 à 5 pour l'été et 1 à 4 pour l'automne). Ces fruits ont été récoltés à raison de cinq jours par semaine (du lundi au vendredi) et pour chaque grappe, le nombre et le poids total des fruits mûrs ont été mesurés pour chacune des plantes/unité expérimentale afin de connaître le rendement (été = 17 juin - 11 août ; automne = 18 novembre - 23 décembre 2015).

#### *3.4.3 Fluorescence chlorophyllienne et taux de chlorophylle*

Des mesures de fluorescence chlorophyllienne ont été prises hebdomadairement (été = 22 mai - 21 juillet ; automne = 29 septembre - 24 novembre), à l'aide d'un fluorimètre (Handy PEA de Hansatech, King's Lynn, Royaume-Uni), sur la feuille du plant suivant la dernière grappe nouée, du côté du traitement lumineux et exposée à 30 minutes d'obscurité avant

chacune des mesures. Ces mesures qui sont un indicateur de la performance photosynthétique (Fv/Fm ; efficacité maximum du photosystème II), nous ont permis de préciser la présence de stress abiotiques (i.e. lumière) (Annexe 2, Figure A.3). Le contenu des feuilles en chlorophylle a été également estimé hebdomadairement (été = 6 mai – 20 juillet ; automne = 29 septembre – 24 novembre 2015) à l'aide d'un chlorophylle-mètre (SPAD-502Plus de Konika Minolta Sensing, Sakai, Japon) sur une feuille exposée aux traitements lumineux et représentative de l'unité expérimentale. Chaque mesure étant la moyenne de 4 prises effectuées succinctement sur une même feuille (évitant les nervures et le pétiole) dans le but de minimiser les variations dues à l'hétérogénéité spatiale des pigments chlorophylliens sur la surface de celle-ci (Annexe 2, Figure A.4).

### 3.5 Maturité et qualités des fruits

#### *3.5.1 Stade de maturité des fruits*

La nouaison de chacun des fruits (grappes 1 à 4) a été datée afin de pouvoir déterminer le nombre de jours entre l'anthèse et la récolte du fruit. Les fruits ont été récoltés sur la base de la valeur des paramètres L\* a\* b\* de la Commission internationale de l'éclairage (CIELab), mesurée à l'aide d'un colorimètre (Minolta Chroma meter, CR 300, Minolta, France). Le paramètre L\* est un indice pour la clarté, a\* pour évaluer la couleur d'un objet variant du vert (valeur négative) au rouge (valeur positive) et b\* du bleu (négatif) au jaune (positif). Nos critères de récolte étaient que deux des mesures prises sur quatre (sur le pourtour à environ 90° de distance), devaient présenter un L\* < 45 (tolérance 0,9), un a\* > 20 et un b\* ≤ a\*. De cette façon, on s'assurait objectivement de l'homogénéité de la maturité des fruits à analyser (Annexe 2, Tableau A.1).

#### *3.5.2 Fermeté des fruits*

Une fois récoltés, la masse fraîche de chacun des fruits a été prise et enregistrée, et au laboratoire, leur fermeté a été mesurée à l'aide d'une sonde mécanique (Bareiss HP, Heinrich Bareiss, Oberdishingen, Allemagne) équipée de l'embout de 0,25 cm<sup>2</sup>, correspondant à un

indice de déplacement de l'embout dans le fruit de 0 et 100 sous une force de 12,5 N. Cinq mesures par fruit ont été prises, en commençant par le dessous, puis quatre sur le pourtour des fruits à une distance d'environ 90°.

### 3.6 Analyses organoleptiques et nutraceutiques des fruits

Une fois les mesures de couleur et de fermeté effectuées, les fruits ont été coupés en deux, puis en cubes d'environ 1 cm<sup>2</sup> et mélangés par grappe/unité expérimentale (4 ou 5 fruits selon la saison / grappe x 2 plants / UE = en moyenne 8 à 10 fruits / échantillon) dans les divers contenants. La première moitié destinée aux analyses organoleptiques, a été emballée dans des sacs de plastique de type Ziploc, étiquetés et entreposés à -20 °C ; et la deuxième partie (max. 120 ml d'échantillon) a été mise en pots de plastique blanc de 250 ml étiquetés, congelés à -80 °C, puis lyophilisés pour les analyses des nutraceutiques selon la procédure opératoire normalisée (PON) pour l'utilisation du Lyophilisateur REPP Virtis 2, pendant 3 jours.

#### *3.6.1 Analyses organoleptiques*

Les échantillons ont été décongelés, broyés, puis homogénéisés dans un mélangeur électrique de 1,5 L à vitesse maximale pendant 40 secondes. Une partie de la purée a ensuite été distribuée dans 2 tubes de 50 ml et centrifugée à 10 000 rpm pendant 20 minutes à 18 °C. Le surnageant résultant, a été utilisé pour la détermination des solides solubles (SS) à l'aide d'un réfractomètre numérique (modèle EW-02940-47, Atago, Japon), à échelle 0-32 degrés Brix. Le pH et la conductivité électrique (CE) ont été déterminés à l'aide d'un pH/CE-mètre (Accumet Excel XL50 Dual channel pH/ion/conductivity meter Fisher Scientific, Hampton, New Hampshire, É-U). L'acidité titrable (AT) quant à elle, a été mesurée par titration de 20 ml de ce surnageant, à l'aide d'une solution de NaOH 0,1 N jusqu'à un pH de 8,1. Cette acidité titrable a été déterminée et calculée selon la formule suivante : % acide citrique =  $(V \times N \times \text{Meq} \times 100) \div Y$ , où  $V$  = volume de NaOH utilisé,  $N$  = normalité du NaOH, Meq = masse d'un milliéquivalent d'acide citrique (0,064 g), et  $Y$  = volume d'extrait de tomate (20 ml). Pour la matière sèche (MS), 2 ml de purée fraîchement homogénéisée pour chaque

échantillon a été récupérée. La masse du tube vide, puis plein a été prise, et celui-ci a alors été entreposé à l'horizontale à -80 °C jusqu'à lyophilisation (Labcono corporation, Freezone, Models 78060 series, Kansas, É-U) à la toute fin. Une fois cette dernière étape complétée, la masse a été à nouveau prise et soustraite du total masse tube plein.

### 3.6.2 Analyses nutraceutiques

Les échantillons lyophilisés ont été broyés au moulin à épices électrique, mis en pots de verre de type Masson étiquetés, puis conservés au congélateur (-30 °C) jusqu'aux analyses.

#### 1) Analyses des caroténoïdes

Pour les caroténoïdes, 0,05 g d'échantillon lyophilisé a été placé dans un tube de 15 ml identifié, extrait avec de l'hexane 100 % (10 ml), vortexé durant 30 secondes, puis placé au frigo à -80 °C pour un minimum de 16 heures. Les échantillons ont alors été conservés dans l'obscurité et sur la glace tout au long des manipulations. Par la suite, les tubes ont été vortexés durant 30 secondes, placés dans un bain ultrason pour 15 minutes (5 °C) puis centrifugé 5 minutes à 10 000 rpm (5 °C). Ensuite, 1 ml de surnageant a été transféré dans un tube de 15 ml, puis conservé à -80 °C jusqu'aux analyses. La présence des caroténoïdes dans les fruits ont été déterminée par HPLC Agilent 1260 (Colonne YMC Carotenoid 5 µm, 4,6 x 250 mm), débit : 1 ml/min, Volume d'injection : 40 µl, Run time : 35 min, Longueur d'onde : 272, 290, 325 et 450 nm, Phase mobile A : Méthanol :eau (98 :2) et B : Méthyl t-butyle éther (MTBE) 100 % et le gradient d'éluion était initialement, 2 % B ; 0-27 min, 2-80 % B ; 27-31 min, isocratique 80 %; 31-31,05 min 80-2 % B ; 31,05-34 min isocratique 2 % B, et avant de procéder à l'analyse des échantillons, ces derniers étaient solubilisés dans 1 ml du mélange (méthanol/dichlorométhane (65/35, v/v)).

#### 2) Analyses de la vitamine C

Pour la vitamine C, 0,5 g de poudre de tomates lyophilisé a été placé dans un tube de 50 ml auquel on a ajouté 15 ml d'acide métaphosphorique à 2 % (4 g dans 200 ml d'eau nanopure),

puis vortexé 1 minute. Les échantillons ont été maintenus sur la glace. Puis, les tubes vortexés ont été placés sur un agitateur à une vitesse de 250 et mélangés mécaniquement pendant 15 min. au froid (4 °C). Les tubes ont été centrifugés pendant 4 minutes à 10 000 rpm (4 °C). Le surnageant a été recueilli à l'aide d'une seringue de 10 ml, filtré (0,45 µm), puis mis dans un vial protégé de la lumière pour les analyses HPLC, effectuées dans les 24 h suivant l'extraction. La concentration de vitamine C dans les tomates a été déterminée à l'aide d'un HPLC Agilent 1100 (Colonne Synergi Hydro-RP, 4 µm Phenomenex 250 X 4,6 mm ; débit 1 ml/min ; Injection 4 µl ; Run Time : 9,5 min ; Longueur d'onde 265 nm ; Phase mobile (97 : 3 : 0,125) v/v de Potassium phosphate monobasique 0,1 M : Méthanol : Tetrabutylammonium hydroxide).

### 3) Analyses des composés phénoliques

Pour les phénols, 0,5 g de poudre a été placé dans un tube de 15 ml, auquel on a ajouté 10 ml de méthanol aqueux 80 % (4 :1). Les tubes ont été agités à la main, puis placés au bain à ultrason pendant 20 minutes à 35 °C, puis centrifugés à 10 000 rpm (35 °C) durant 4 minutes. Le surnageant a été récupéré, puis le culot a été extrait de nouveau avec 10 ml de méthanol 80 % selon les étapes décrites précédemment. Les extraits ont été combinés puis le volume a été complété à 25 ml avec de l'eau mQ (milli-Q). Les composés phénoliques ont été analysés par UPLC-MS-MS sur un appareil Waters Acquity H-Class (Waters, Milford, MA, USA), équipé avec un système de pompe quaternaire (Waters, Milford, MA, USA). Une colonne *C<sub>18</sub> Acquity high-strength silica (HSS) T3* (150 x 2.1 mm id, 1.8 µm) a été utilisée (Waters, Milford, MA, USA). Les composés phénoliques ont été séparés à une température de 40 °C avec une phase mobile qui consistait en 0,1 % d'acide formique (éluent A) et d'acétonitrile (éluent B), le débit était ajusté à 0,4 ml/min., selon le gradient d'élution suivant : 5 % B, 0-4,5 min ; 5-20 % B, 4,5-6,45 min ; isocratique 20 % B, 6,45-13,5 min ; 20-45 % B, 13,5-16,5 min ; 45-100 % B, 16,5-19,5 min ; isocratique 100 % B, 19,5-19,52 min ; 100-5 % B, 19,52-22,5 min ; isocratique 5 % B. La détection a été réalisée par spectrométrie de masse grâce à un TQD (Water, Milford, MA, USA) équipé avec une source d'ionisation *Z-spray electrospray*. Les analyses ont été faites en mode négatif et les données ont été recueillies par monitoring de réactions multiples (MRM) (Tableau 3). Les paramètres de la source

d'ionisation étaient : Cap volt, 2,5 kV ; température de la source, 140 °C ; débit du cône de gaz, 80 L/h ; débit du gaz de désolvatation, 900 L/h et la T° de désolvatation, 350 °C. L'azote (pureté 99 %) et l'argon (pureté 99 %) ont été utilisés respectivement comme gaz de nébulisation et de collision. L'acquisition des données a été réalisée avec le logiciel MassLynx 4,1 (Waters, Milford, MA, USA). Tous les composés phénoliques ont été quantifiés en équivalent d'acide gallique. Les phénols totaux ont quant à eux, été évalués par méthode spectrophotométrique à l'aide du réactif de Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich, F9252) exprimé en équivalent acide gallique ( $\mu\text{g}$  d'EAG par gramme de M.S.).

#### 4) Analyses minérales

Pour les analyses minérales, 2 g de poudre lyophilisée par échantillon, ont été extraits par digestion de type Isaac (Isaac et Johnson, 1976), suivie par une analyse colorimétrique automatisée (QuickChem 8500 serie II, Lachat Instruments, Colorado, USA) pour l'azote (N) et par spectrométrie d'émission à plasma d'argon (ICP-AOE) (ICAP7400 duo de ThermoFisher, USA) pour les autres éléments (P, K, Mg, Ca, Mn, Zn, Cu, Fe).

**Tableau 3** : Transitions MRM et paramètres MS optimisés utilisés pour l'analyse des composés phénoliques des tomates par UHPLC-MS.

Composé phénolique	Transition (m/z)	Tension de cône (V)	Énergie de collision (eV)
Acide gallique	169 > 125	30	14
A. homovanillique- <i>o</i> -hexoside	343 > 181	28	20
Acide férulique- <i>o</i> -hexoside	355 > 193	24	15
Acide cafféique- <i>o</i> -hexoside 1	341 > 179	28	22
Acide cafféique- <i>o</i> -hexoside 2	341 > 179	28	22
Rutine- <i>o</i> -hexoside	771	40	1
Acide coumaroylquinique	337 > 191	25	15
Acide 3-cafféoylquinique	353 > 191	24	15
Acide 5-cafféoylquinique	353 > 191	24	15
Acide 4-cafféoylquinique	353 > 191	24	15
Phlorétine- <i>c</i> -diglucoside	597 > 357	45	25
Rutine- <i>o</i> -pentoside	741 > 300	45	25
Phloridzine- <i>c</i> -diglucoside	759 > 549	45	25
Acide cafféique	179 > 135	28	15
Acide dicafféoylquinique	515 > 191	45	29
Kaempférol-3- <i>o</i> -rutinoside	593 > 285	42	29
A. coumarique- <i>o</i> -hexoside 1	325 > 163	26	19
A. coumarique- <i>o</i> -hexoside 2	325 > 163	26	19
Naringénine	271 > 151	25	15
Rutine	609 > 300	55	38

### 3.7 Analyses Statistiques

Les données recueillies ont été traitées par une analyse de variance (ANOVA), à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS version 9.4 (SAS Institute, 2015) au seuil de signification de  $P < 0,05$ . Trois analyses ont été réalisées : 1- Une analyse incluant les deux périodes expérimentales (temps) qui nous a permis de comparer les deux saisons expérimentales et de regrouper ( $P > 0,05$ ) ou non ( $P < 0,05$ ) les données de ces deux saisons de culture ; 2- Une analyse LSD protégée de l'effet de la position des lampes afin de regrouper ( $P > 0,05$ ) ou non ( $P < 0,05$ ) les traitements de positionnement horizontal et vertical des lampes pour un même traitement d'ÉA. Ces deux analyses comportaient des mesures répétées tels que le

temps et les semaines. De plus l'analyse LSD protégée a également permis de comparer les traitements d'ÉA entre eux ; 3- Une analyse combinée avec un témoin (sans ÉA intra-canopée) afin de voir s'il y avait une différence significative ( $P < 0,05$ ) entre chacun des 8 traitements d'ÉA et le témoin sans ÉA. La correction de Dunnett a été utilisée, permettant ainsi de tirer des conclusions lorsque l'effet simple était significatif ( $P \leq 0,05$ ).

## 4. RÉSULTATS

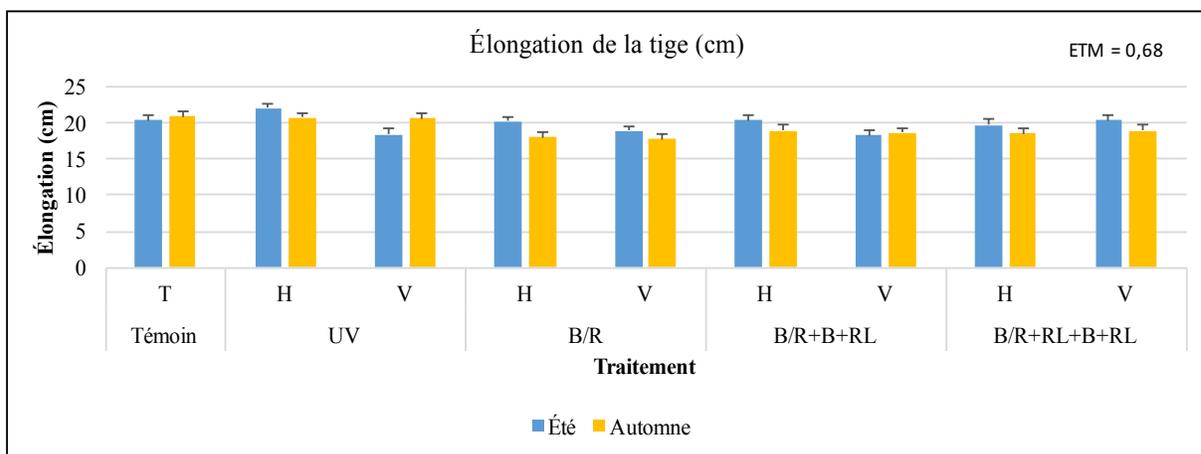
### 4.1 Croissance

#### 4.1.1 Hebdomadaire

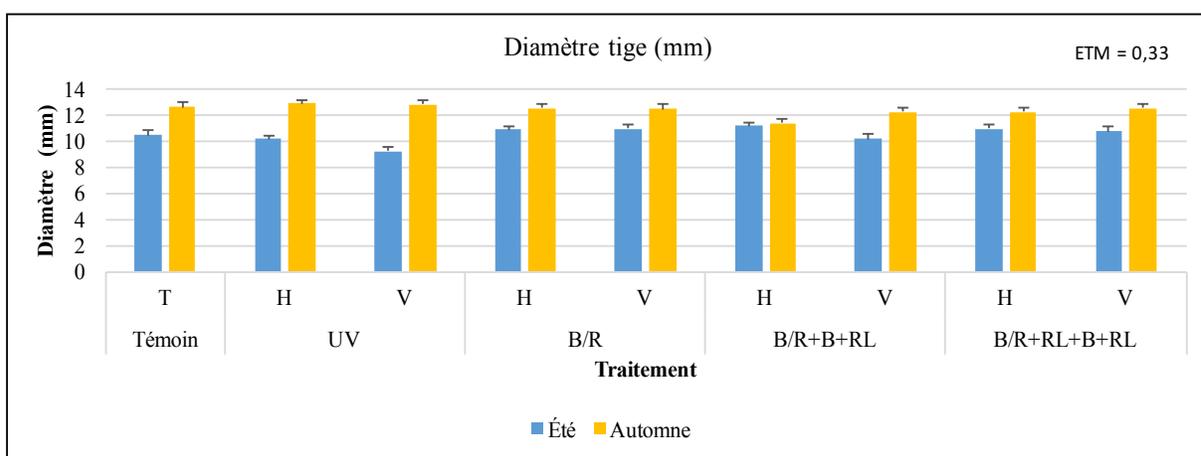
Les résultats de comparaison des traitements d'ÉA pour les deux périodes de culture, été et automne, ont montré des différences significatives ( $P < 0,0001$ ) pour le diamètre de tige et la longueur de feuille. Ces résultats sont donc présentés par période de culture (Tableau 4). D'autre part, les Figures 6 à 8 montrent les effets entre les traitements d'ÉA ( $P = 0,0202$  période ;  $0,0039$  ÉA). Le diamètre des tiges a été plus élevé à l'automne pour tous les traitements (Figure 7), alors que les résultats ont été généralement plus bas (sauf UV) pour l'élongation de tige et la longueur de feuille pour cette même période (Figures 6 et 8). Par contre, pour chacune des saisons prise individuellement, aucune valeur significative n'est ressortie entre les traitements d'ÉA vs le témoin et rien non plus en ce qui concerne le positionnement horizontal et vertical des lampes (Figures 6, 7 et 8).

**Tableau 4 :** Effets des traitements d'ÉA sur la croissance hebdomadaire des plantes cultivées en été et en automne. Les valeurs sont la moyenne de  $n = 80$  (moyenne 2 UE (H et V) x 4 répétitions x 10 semaines). Aucun effet significatif n'a été observé pour l'élongation de la tige. Les moyennes des traitements d'ÉA suivies de lettres différentes sur une même colonne sont significativement différentes entre elles selon un test de LSD protégé ( $P < 0,05$ ).

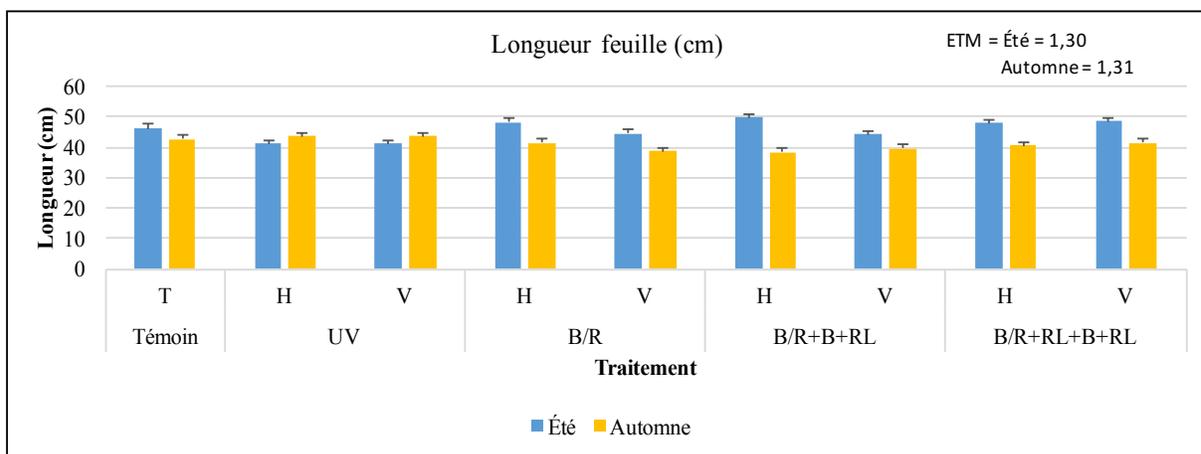
Traitements ÉA	Diamètre tige (mm)		Longueur feuille (cm)		Élongation tige (cm)
	(P = 0,0094)		(P < 0,0001)		(P = 0,0220)
	Été	Automne	Été	Automne	Été + Automne
UV	9,69 b	12,87 a	41,16 b	43,58 a	20,53 a
B/R	10,90 a	12,48 ab	46,36 a	39,94 b	18,73 b
B/R + B + RL	10,67 a	11,81 b	46,91 a	38,98 b	19,05 b
B/R + RL + B + RL	10,85 a	12,43 ab	48,16 a	40,92 ab	19,39 ab



**Figure 6 :** Histogramme représentant l'élongation hebdomadaire moyenne des plantes selon le traitement d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) et selon la saison de culture (été, automne), n = 40 (1 plant/UE x 4 répétitions x 10 semaines). Un effet significatif a été observé entre les périodes de cultures ( $P = 0,0202$ ) et entre les traitements d'ÉA ( $P = 0,0039$ ).



**Figure 7 :** Histogramme représentant le diamètre hebdomadaire moyen des tiges selon le traitement d'ÉA (Témoin), UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) et selon la saison de culture (été, automne), n = 40 (1 plant/UE x 4 répétitions x 10 semaines). Un effet significatif a été observé entre les périodes de cultures ( $P < 0,0001$ ) et les traitements d'ÉA ( $P < 0,0001$ ).



**Figure 8 :** Histogramme représentant la longueur hebdomadaire moyenne des feuilles selon le traitement d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) et selon la saison de culture (été, automne),  $n = 40$  (1 plant/UE x 4 répétitions x 10 semaines). Un effet significatif a été observé entre les périodes de culture ( $P < 0,0001$ ) et les traitements d'ÉA ( $P < 0,0001$ ).

Par ailleurs, lorsque les huit traitements d'ÉA ont été comparés entre eux, une différence significative ( $P = 0,0220$ ) a été observée pour la croissance hebdomadaire (longueur de tige) des plantes, et ce peu importe le positionnement des lampes ( $P > 0,05$ ) et la saison de culture ( $P > 0,05$ ). Ainsi, les plantes ayant reçu un ÉA UV (20,53 cm) avaient une croissance plus élevée de 7,8 % à 9,6 % par rapport aux traitements B/R+B+RL (19,05 cm) et B/R (18,73 cm), respectivement, alors qu'aucune différence significative n'a été observée entre le traitement B/R+RL+B+RL (19,39 cm) et les autres traitements d'ÉA. L'utilisation d'un ÉA UV en été (mai à juillet) a réduit de 11,5 % le diamètre de la tige et de 14,5 % la longueur de feuille par rapport aux autres traitements d'ÉA alors que ces paramètres ont été plus élevés de 9 % par rapport au traitement d'ÉA B/R+B+RL et de 10,4 % par rapport aux traitements d'ÉA B/R et B/R+B+RL en automne (septembre à décembre) (Tableau 4).

#### 4.1.2 Biomasse

1) Le positionnement des lampes n'a eu aucune différence significative ( $P > 0,05$ ) sur les paramètres de croissance étudiés (Tableau 5). Une différence hautement significative ( $P < 0,0001$ ) entre les saisons été et automne pour les moyennes générales de la masse sèche des fruits a été observée (Tableau 5). Toutefois, aucune différence significative entre les

traitements d'ÉA et le traitement témoin n'a été observée, ainsi qu'entre les quatre traitements d'ÉA entre eux.

2) En ce qui concerne la biomasse fraîche et sèche des feuilles, une interaction significative entre les traitements d'ÉA et la saison de culture a été observée. Le Tableau 6 présente donc les moyennes pour chacun des traitements d'ÉA et périodes de culture. Ainsi, pour la culture d'été, un effet significatif des traitements d'ÉA par rapport au témoin (analyse combinée) a été observé ( $P \leq 0,0001$ ), alors qu'en automne, aucune différence significative n'a été observée (Tableau 6). De plus, une différence significative entre les traitements d'ÉA entre eux a été observée lors de la culture d'été ( $P \leq 0,0003$ ), le traitement UV ayant réduit la biomasse des feuilles (Tableau 6). Pour la culture d'été, la biomasse fraîche des feuilles était significativement plus élevée pour les traitements B/R horizontal (H) et vertical (V) de 31 % ( $P = 0,0330$ ) et 42 % ( $P = 0,0033$ ), et de 34 % ( $P = 0,0182$ ) pour le traitement B/R+B+RL-H, par rapport au témoin (Tableau 6). Aussi, la masse sèche des feuilles était significativement supérieure à celle du témoin, chez tous les traitements d'ÉA, sauf pour les traitements UV. Cette augmentation était de l'ordre de 39 % et 50 % pour les traitements B/R-H et V ( $P = 0,0117$  ;  $0,0011$ ), de 44 % et 34 % pour les traitements B/R+B+RL-H et V ( $P = 0,0039$  ;  $0,0348$ ), et finalement de 38 % et 42 % pour les traitements B/R+RL+B+RL-H et V ( $P = 0,0168$  ;  $0,0067$ ). Par rapport aux traitements d'ÉA B/R, B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL, l'utilisation d'un ÉA UV a significativement réduit la biomasse fraîche et sèche des plantes.

3) Quant à la surface foliaire, un effet significatif de la saison de culture a été observée ( $P < 0,0001$ ) ainsi qu'un effet significatif entre les traitements d'ÉA ( $P = 0,0004$ ). L'analyse combinée de la surface foliaire a également montré une interaction significative ( $P < 0,0001$ ) entre les traitements d'ÉA et la saison d'expérimentation (Tableau 5). Pour la culture d'été et la surface foliaire, le traitement B/R-V était supérieur de 33 % ( $P = 0,0137$ ) par rapport au témoin.

4) En ce qui concerne la biomasse fraîche des tiges, aucune différence n'a été observée entre les moyennes générales des deux saisons de culture. Toutefois, une différence significative

entre les traitements d'ÉA a été observée lors de la culture d'été (Tableau 6). L'analyse combinée a montré une différence significative entre le traitement B/R+RL+B+RL-V et le témoin ( $P = 0,0028$ ) et ce pour les deux périodes ( $P = 0,0183$ ). Similairement, la biomasse sèche des tiges a été affectée par les traitements d'ÉA, et ce pour les deux saisons de culture (Tableau 6). À la culture d'été, la masse fraîche des tiges des plantes soumises à un ÉA UV ont été significativement réduites par rapport aux autres traitements d'ÉA (B/R, B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL). Comparativement au témoin, la masse sèche des tiges du traitement d'ÉA B/R+RL+B+RL-V a été supérieure de 46 % ( $P = 0,0139$ ). Quant à la culture d'automne, la masse sèche des tiges du traitement d'ÉA B/R+RL+B+RL-V a été de 37 % supérieure au témoin ( $P = 0,0209$ ). De plus, la masse sèche des tiges des plantes soumises au traitement d'ÉA B/R+RL+B+RL a été supérieure aux traitements d'ÉA B/R et UV, alors que la biomasse de la tige du traitement d'ÉA B/R+B+RL a été supérieure au traitement d'ÉA UV.

5) La saison de culture n'a pas affecté la longueur des entre-nœuds lorsque l'ensemble des traitements ÉA ont été comparé entre eux. Les traitements d'ÉA ont toutefois affecté la longueur des entre-nœuds au cours de la culture d'été (Tableau 6). L'analyse combinée a cependant montré un effet significatif de la saison ( $P = 0,0358$ ) mais aucun effet significatif entre les traitements d'ÉA et le témoin, et ce pour les deux saisons de culture.

**Tableau 5 :** Valeurs P des effets observés pour les paramètres de croissance destructives (8 traitements x 2 cultures x 4 répétitions).

	m.s.	m.f.	m.s.	Surface	m.f.	m.s.	Long.
	Fruits	Feuilles	Feuilles	Foliaire	Tige	Tige	Entre-nœud
Trt ÉA	0,3624	0,0016	0,0059	0,0145	0,0089	0,0001	0,0168
Position	0,7168	0,8818	0,4973	0,3366	0,6276	0,2109	0,1269
Pos*Trt ÉA	0,3317	0,5860	0,9656	0,8280	0,5355	0,6362	0,1196
Saison	<0,0001	0,1468	0,5239	0,0003	0,8701	0,0039	0,8118
Trt ÉA*Saison	0,1790	0,0003	<0,0001	0,0004	0,0036	0,1040	0,2033
Pos*Saison	0,2753	0,5949	0,6965	0,9630	0,4829	0,1722	0,5449
Analyse combinée							
Trt ÉA vs témoin	0,2261	0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0028	0,0509	0,9934
Saison	<0,0001	0,3332	0,9213	<0,0001	0,8033	0,0020	0,0358
Trt ÉA vs Témoin*Saison	0,1850	0,0014	<0,0001	<0,0001	0,0183	0,3707	0,1306

**Tableau 6** : Biomasses moyennes des plantes (fruits, tiges, feuilles) soumises aux différents traitements d'ÉA (H = horizontal, V = vertical) au cours de deux périodes de culture (moyenne ; erreur type de la moyenne ; sèche n = 4 (1 plant/UE x 4 rép.) ; fraîche n = 8 (2 plant/UE x 4 rép.)). L'analyse combinée montre les différences significatives entre chacun des traitements d'ÉA-position et le témoin, alors qu'une analyse LSD protégée entre les 8 traitements d'ÉA montre la différence entre les traitements d'ÉA. Aucun effet position ou interaction traitement ÉA\*position n'a été significatif. Pour chacun des traitements d'ÉA, les valeurs H et V ont donc été regroupées.

Variable mesurée	Traitement									ETM	Valeur de P
	Témoin	UV		B/R		B/R + B + RL		B/R + RL + B + RL			
	T	H	V	H	V	H	V	H	V		
<b>Été</b>											
Masse sèche fruit (g)		92,30		111,12		136,75		135,25		17,03	0,1163
	95,00	80,16	104,92	107,50	114,75	132,50	141,00	132,50	138,00	21,88	0,3565
Masse fraîche feuille (g)		1473,69 b		2309,44 a		2130,56 a		2084,50 a		91,3280	<0,0001
	1691,75	1467,63	1479,75	<b>2224,50</b>	<b>2394,37</b>	<b>2270,38</b>	1990,75	2124,63	2044,38	123,55	<0,0001
Masse sèche feuille (g)		145,13 b		227,44 a		218,56 a		219,44 a		9,3137	<0,0001
	157,00	143,50	146,75	<b>218,75</b>	<b>236,13</b>	<b>226,75</b>	<b>210,37</b>	<b>216,00</b>	<b>222,88</b>	12,47	<0,0001
Surface foliaire (cm <sup>2</sup> )		35727 b		54702 a		49267 a		49390 a		2419,16	<0,0001
	43207	35691	35764	51938	<b>57465</b>	51734	46800	52928	45852	2970,82	<0,0001
Long. entre-nœuds (cm)		27,71 ab		24,92 c		25,43 bc		28,89 a		0,90	
	27,49	29,26	26,15	25,19	24,65	25,24	25,61	26,05	31,73	1,24	0,0072*
Masse fraîche tige (g)		540,13 b		742,00 a		697,63 a		725,88 a		28,64	<0,0001
	616,75	537,50	542,75	716,75	767,25	748,50	646,75	711,75	740,00	39,36	0,0007*
Masse sèche tige (g)		52,00 b		74,38 a		76,13 a		81,25 a		4,03	0,0001
	58,25	52,25	51,75	75,00	73,75	79,50	72,75	77,25	<b>85,25</b>	5,57	0,0009
<b>Automne</b>											
Masse sèche fruit (g)		144,76		163,98		159,39		150,33		16,39	0,7684
	156,07	118,91	170,62	180,22	147,75	181,92	136,85	145,16	155,50	20,90	0,3652
Masse fraîche feuille (g)		1940,56		1931,00		1847,94		1892,81		91,3280	0,8865
	1947,00	2015,88	1865,25	1929,25	1932,75	1835,00	1860,88	1782,13	2003,50	123,55	0,9120
Masse sèche feuille (g)		204,88		192,16		200,48		198,16		9,3137	0,8085
	182,20	207,00	202,75	190,73	193,60	186,73	214,23	196,58	199,75	12,47	0,7266
Surface foliaire (cm <sup>2</sup> )		43528		42095		37872		37017		2419,16	0,1865
	39491	45778	41278	47544	36646	34330	41414	36385	37650	2970,82	0,0539
Long. entre-nœuds (cm)		27,74		26,40		25,65		26,54		0,90	
	28,75	27,30	28,18	25,88	26,93	24,12	27,18	26,30	26,78	1,24	0,3554
Masse fraîche tige (g)		679,50		665,25		657,00		690,50		28,64	0,8463
	685,50	687,00	672,00	656,00	674,50	638,50	675,50	662,00	719,00	39,36	0,9481
Masse sèche tige (g)		71,94 c		74,05 bc		83,66 ab		89,21 a		4,03	0,0166
	68,75	67,25	76,63	70,30	77,80	81,93	85,40	84,05	<b>94,38</b>	5,57	0,0323

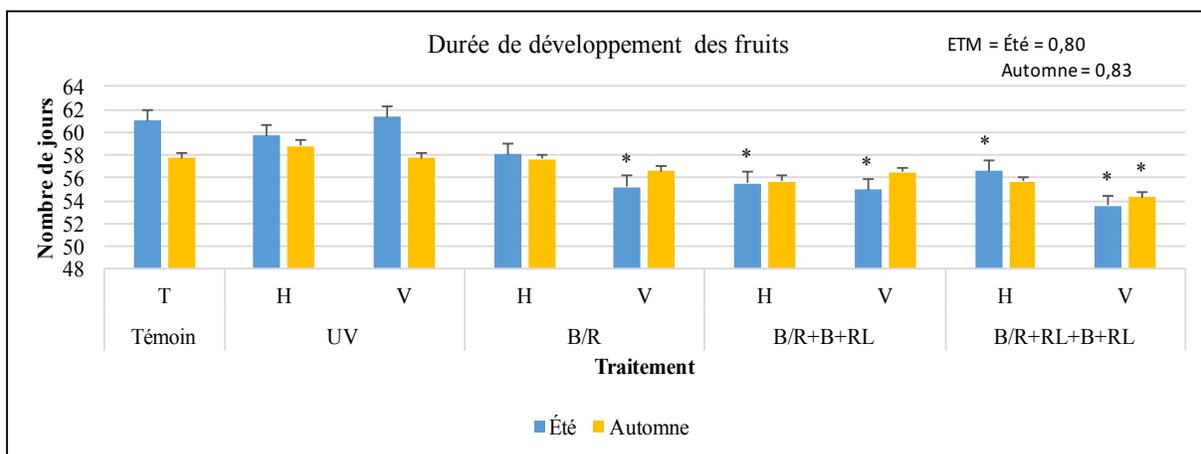
Les valeurs en **gras** sont significativement différentes du témoin ; \* selon le test de Dunnett, aucune différence significative n'a été observée (P < 0,05).

## 4.2 Développement et rendement

### *4.2.1 Durée de développement des fruits*

En ce qui concerne la durée de développement des fruits (nombre de jours entre la nouaison et la récolte), une différence significative entre les deux saisons de culture a été observée ( $P = 0,0137$ ) alors qu'aucune différence n'a été observée quant à l'effet du positionnement des lampes des traitements d'ÉA. Une différence significative ( $P < 0,0001$ ) entre les traitements d'ÉA-position et le témoin a toutefois été observée (analyse combinée) ainsi qu'entre les traitements d'ÉA (LSD protégé) entre eux (effet de positionnement confondu).

Pour la culture d'été, le délai entre la nouaison et la récolte des fruits, a été réduit chez cinq des huit traitements d'ÉA-position par rapport au témoin (60,99 jours) ; soit de 9 % pour B/R-V (55,23 j ;  $P = 0,0002$ ) et B/R+B+RL-H (55,55 j ;  $P = 0,0003$ ), de 7 % pour B/R+RL+B+RL-H (56,62 j ;  $P = 0,0033$ ), de 10 % pour B/R+B+RL-V (54,96 j) et de 12 % pour B/R+RL+B+RL-V (53,53 j ;  $P < 0,0001$ ) (Figure 9). Le temps de développement des fruits a été plus élevé ( $P < 0,0001$ ) sous le traitement d'ÉA-UV (60,53 j) par rapport aux traitements d'ÉA B/R (56,66 j), B/R+B+RL (55,27 j) et B/R+RL+B+RL (55,05 j). Lors de la culture automnale, la durée de développement du fruit par rapport au témoin (57,71 j) a été significativement ( $P = 0,0373$ ) réduite de 6 % pour le traitement B/R+RL+B+RL-V (54,34 j) (Figure 10). Le traitement ÉA B/R+RL+B+RL (55,03 j) avait une durée de développement inférieure aux traitements d'ÉA B/R (57,11 j) et UV (58,28 j), alors le traitement d'ÉA B/R+B+RL (56,10 j) avait une valeur inférieure au traitement ÉA UV.



\* Représente les valeurs significativement différentes du témoin.

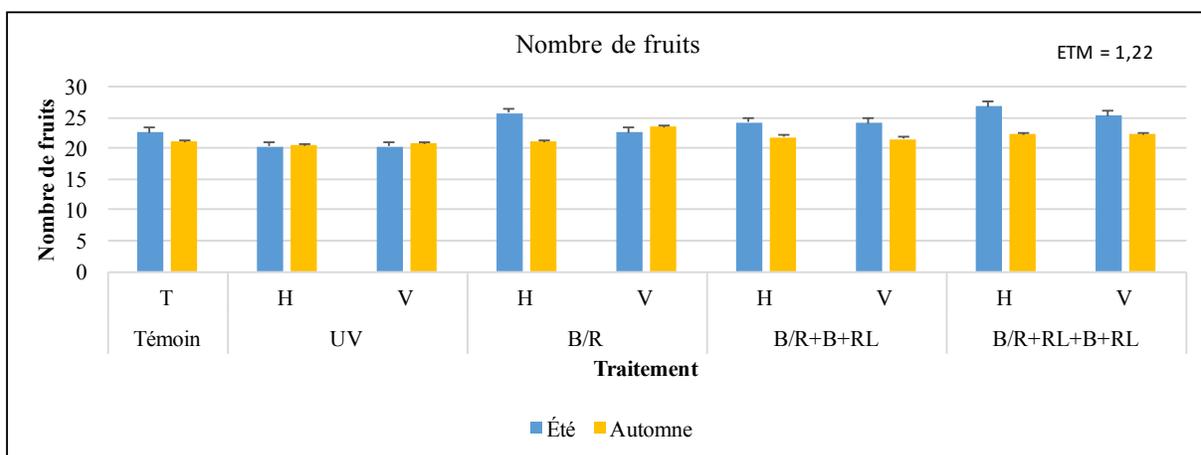
**Figure 9 :** Histogramme représentant le nombre de jours moyen entre la nouaison et la récolte du fruit selon le traitement d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) et la saison de culture (été ; automne), été n = 120 (5 fruits/grappe x 3 grappes x 2 plants/UE x 4 répétitions), automne n = 96 (4 fruits/grappe x 3 grappes x 2 plants/UE x 4 répétitions).<sup>10</sup>

#### 4.2.2 Récolte

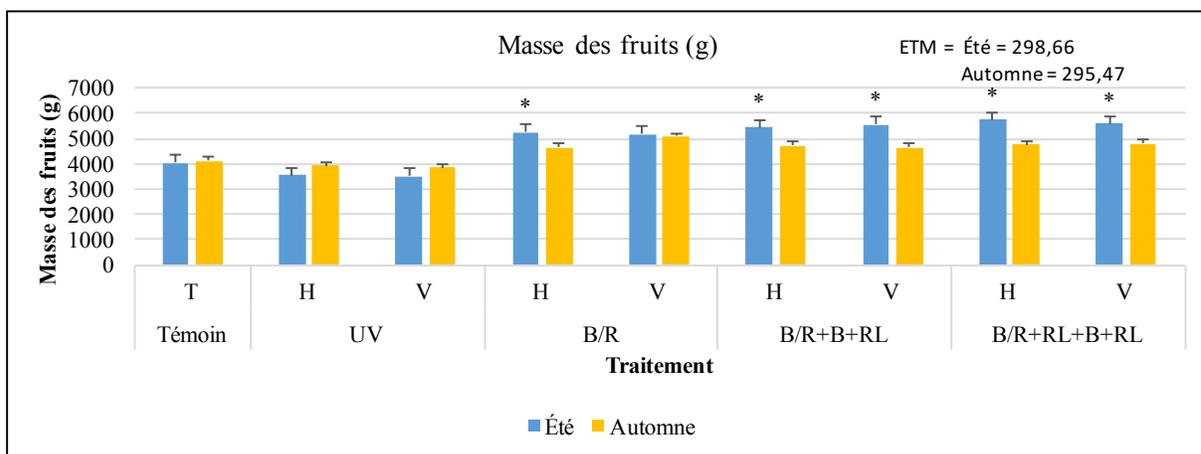
Une différence significative entre les deux saisons de culture a été observée pour le nombre ( $P = 0,0024$ ) et la masse totale des fruits récoltés sur les trois grappes étudiées ( $P = 0,0109$ ) (Figures 10 et 11). Aucun effet significatif de la saison de culture n'a toutefois été observé pour le calibre des fruits (Figure 12). Pour la masse ( $P = 0,0011$ ) et le calibre ( $P = 0,0072$ ) des fruits, l'analyse combinée a montré des différences significatives entre certains traitements d'ÉA-position et le témoin, et ce que pour la culture d'été, alors qu'aucun effet n'a été observé pour le nombre de fruits (Figure 10). Une interaction significative entre le positionnement des lampes et la saison de culture a été observée pour le calibre des fruits ( $P = 0,0469$ ) (Figure 12). Par ailleurs, une différence significative entre les traitements d'ÉA selon les saisons de culture a également été observée pour le nombre de fruits, la masse des fruits et le calibre des fruits (Tableau 7).

Plus spécifiquement, lors de la culture d'été, le nombre de fruits des traitements d'ÉA-position a été similaire au traitement témoin (Figure 10). Par contre, le nombre de fruits du

traitement ÉA-UV a été inférieur de 23 % au nombre de fruits des traitements d'ÉA B/R, B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL (Tableau 7). La masse fraîche des fruits de cinq traitements d'ÉA-position sur huit a montré des poids significativement supérieurs aux poids des fruits témoins soit : de 30 % pour B/R-H ( $P = 0,0441$ ), 35 % pour B/R+B+RL-H ( $P = 0,0148$ ), 37 % pour B/R+B+RL-V ( $P = 0,0087$ ), 42 % pour B/R+RL+B+RL-H ( $P = 0,0027$ ) et 38 % pour B/R+RL+B+RL-V ( $P = 0,0075$ ) (Figure 11). De plus, la masse des fruits du traitement ÉA-UV a été inférieur de 55 % à la masse des fruits des traitements d'ÉA B/R, B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL (Tableau 7). Pour le calibre moyen des fruits, une augmentation significative de 27 % ( $P = 0,0124$ ) pour B/R-V et de 28 % ( $P = 0,0100$ ) pour B/R+B+RL+V ont été observées (Figure 12), alors que le calibre des fruits soumis à un ÉA-UV a été de 27 % inférieur aux fruits des plants soumis à un ÉA B/R, B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL (Tableau 7). Lors de la culture d'automne, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements d'ÉA-position et le témoin pour ces variables. Par contre, une différence significative entre les traitements d'ÉA et la masse ainsi que le calibre des fruits a été observée (Tableau 7). Tout comme la culture d'été, les fruits des plantes soumises à un ÉA-UV avaient une masse (25 %) et un calibre (15 %) de fruits inférieurs aux traitements ÉA B/R, B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL.

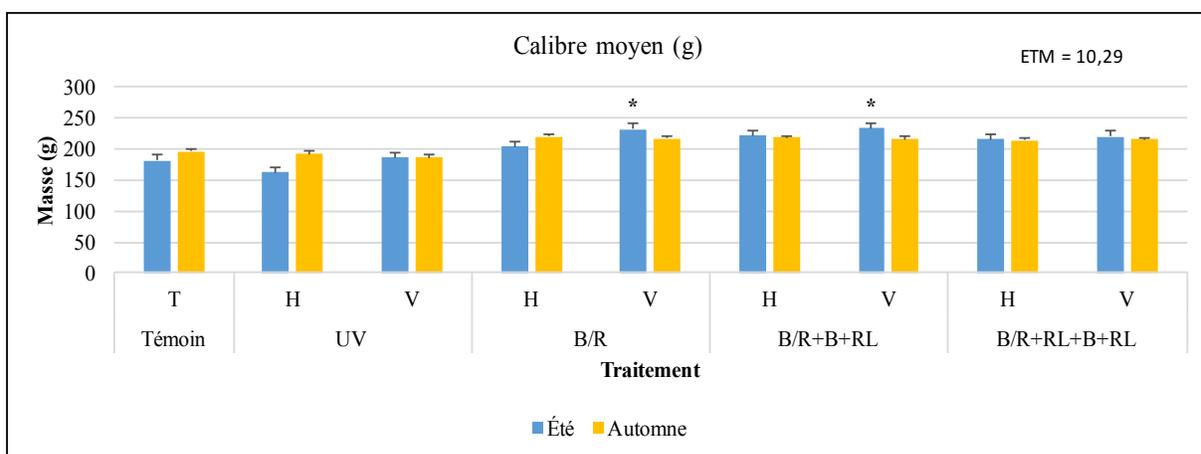


**Figure 11** : Histogramme représentant le nombre total de fruits récoltés sur les trois grappes étudiées des plants soumis aux traitements d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne),  $n = 8$  (2 plants/ UE x 4 répétitions). Un effet significatif entre les deux saisons ( $P = 0,0024$ ) et entre les traitements d'ÉA au cours de l'été ( $P = 0,0358$ ) ont été observés.



\* Représente les valeurs significativement différentes du témoin

**Figure 12 :** Histogramme représentant le total de la masse moyenne (g) des fruits pour les trois grappes étudiées des plants soumis aux traitements d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne), n = 8 (2 plants/UE x 4 répétitions). Une différence significative entre les saisons de culture ( $P = 0,0109$ ) et les traitements d'ÉA au cours de l'été ( $P = 0,0011$ ) ont été observés.



\* Représente les valeurs significativement différentes du témoin.

**Figure 13 :** Histogramme représentant le calibre moyen (g) des fruits sur les grappes étudiées des plants soumis aux traitements d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne), n = 96 (2 plants/UE x 4 répétitions x 12 semaines). Un effet significatif des traitements d'ÉA a été observé au cours de l'été ( $P = 0,072$ ).

**Tableau 7 :** Nombre, masse et calibre moyen des fruits des trois grappes étudiées des plants soumis à différents traitements d'ÉA au cours de deux saisons de croissance. Les valeurs sont la moyenne des deux positionnements des lampes puisqu'aucun effet de position n'a été observé. Un test LSD protégé a été effectué pour chacune des cultures puisqu'une interaction significative ÉA\*saison a été observée. Les lettres minuscules montrent les différences significatives entre les traitements ÉA pour la culture d'été alors que les lettres majuscules montrent les différences pour la culture d'automne.

	ÉA UV		ÉA B/R		ÉA B/R + B + RL		ÉA B/R + RL + B + RL	
	Été	Automne	Été	Automne	Été	Automne	Été	Automne
Nombre total de fruits (nb/plant)	20 b	21	24 a	22	24 a	22	26 a	22
Masse totale des fruits (g/plant)	3515 b	3879 B	5210 a	4857 A	5500 a	4673 A	5658 a	4857 A
Calibre moyen des fruits (g)	174 b	189 B	218 a	219 A	228 a	217 A	218 a	215 A

Récolte été = 17 juin - 11 août 2015 ; automne = 18 novembre - 23 décembre 2015

### 4.3 Qualité des fruits

#### *4.3.1 Physico-chimie*

La fermeté des fruits a été influencée par la saison de culture et le positionnement des lampes (interactions significatives ;  $P = 0,0099$  et  $P = 0,0023$  pour l'analyse combinée) (Tableau 8). Cette différence entre le positionnement horizontal et vertical n'a toutefois été significative que pour la culture d'été ( $P = 0,0011$ ) (Tableau 9). Une interaction significative entre les traitements d'ÉA et la saison de culture a été observée pour le contenu des fruits en solides solubles ( $P = 0,0101$ ). De plus, l'analyse combinée a montré une interaction significative ( $P = 0,0115$ ) entre le témoin et les traitements ÉA\*Saison (Tableau 8). Pour la conductivité électrique des fruits, aucun effet de la saison de culture ou du positionnement des lampes n'a été observé. Par contre, la CE des fruits a varié selon les traitements d'ÉA (Tableau 8). Ainsi, pour les deux saisons de cultures, des différences significatives entre les traitements d'ÉA-position et le témoin ont été observées ( $P < 0,0001$  et  $P = 0,0216$ ) (Tableau 8). Par ailleurs, une interaction significative a été observée entre les traitements d'ÉA et la saison de culture pour le contenu des fruits en acides titrables ( $P = 0,0011$ ) ainsi qu'entre la saison de culture et le positionnement des lampes (Pos\*Saison ;  $P = 0,0241$ ) (Tableaux 8 et 9). L'analyse LSD

protégée effectuée pour chacune des saisons montre les différences significatives entre les traitements d'ÉA ( $P = 0,0011$ ) (Tableau 10). Similairement au contenu des fruits en solubles solides et en acides titrables, une interaction significative entre les traitements d'ÉA et la saison ( $P = 0,0075$ ) a été observée pour le pourcentage de matière sèche des fruits ainsi qu'entre les traitements d'ÉA et le témoin, et ce en fonction des saisons (analyse combinée,  $P = 0,0100$ ) (Tableau 8). Le tableau 9 montre les différences significatives entre les traitements d'ÉA\*position pour chacune des saisons, alors que le Tableau 10 montre les différences entre les traitements d'ÉA (interaction ÉA\*position non significative).

**Tableau 8 :** Valeurs P observés pour les paramètres de physico-chimie mesurés sur les fruits pour chacune des deux saisons de culture.

	Fermeté	Solubles solides (%)	Conductivité électrique (mS/cm)	Acidité titrable (% acide citrique)	Masse sèche (%)
Trt ÉA	0,9856	0,0018	<0,0001	0,0015	0,0006
Position	0,0344	0,2584	0,6988	0,1388	0,3051
Pos*Trt ÉA	0,3397	0,3690	0,0750	0,3384	0,5517
Saison	<0,0001	0,0188	0,7884	0,0754	0,0103
Trt ÉA*Saison	0,9788	0,0101	0,2552	0,0011	0,0075
Pos*Saison	0,0099	0,3071	0,1208	0,0241	0,2415
Analyse combinée					
Trt ÉA vs témoin	0,0045	0,0328	0,0216	0,0003	0,1404
Saison	<0,0001	0,0063	0,3054	0,3243	0,0004
Trt ÉA vs Témoin*Saison	0,0023	0,0115	0,1709	0,0009	0,0100

Plus spécifiquement, les données de fermeté des fruits pour la culture d'été ont montré que le traitement B/R-V était significativement plus élevé de 7 % ( $P = 0,0225$ ) que le témoin (Tableau 9). Aucune différence n'a été observée entre les traitements d'ÉA (Tableau 10). Par rapport au témoin, le contenu des fruits en solubles solides a été plus élevé de 11 %, 9 % et 12 % pour les traitements UV-H, B/R+B+RL-V et B/R+RL+B+RL-V ( $P = 0,0159$  ;  $0,0426$  ;

0,0056). En été, les traitements d'ÉA UV (s.s. 4,62 %) et B/R+RL+B+RL (s.s. 4,60 %) ont eu un contenu en solides solubles plus élevé que ÉA B/R (s.s. 4,38 %) (Tableau 10). La conductivité électrique des fruits soumis aux traitements UV a été plus élevée de 12 % pour le H et de 13 % pour le V ( $P = 0,0263$  ;  $0,0111$ ) que la CE des fruits témoins (Tableau 9). De plus, la CE des fruits sous un ÉA UV (6,03 mS/cm) a été plus élevée que celle des fruits exposés à ÉA B/R (5,27 mS/cm), B/R+B+RL (5,43 mS/cm) et B/R+RL+B+RL (5,62 mS/cm), alors que la CE des fruits soumis à un ÉA B/R+RL+B+RL a été plus élevée que ÉA B/R (Tableau 10). Quant à l'acidité titrable, les traitements UV ont également obtenu des données qui différaient du témoin, et plus précisément supérieures de l'ordre de 22 et 26 % pour UV-H et UV-V ( $P = 0,0056$  ;  $P = 0,0009$ ) (Tableau 9). De plus, la teneur en acides titrables des fruits des traitements ÉA UV (0,508 %) a été supérieure aux traitements d'ÉA B/R (0,422 %), B/R+B+RL (0,423 %) et B/R+RL+B+RL (0,431 %) (Tableau 10). Le pourcentage de matière sèche n'a montré aucune différence entre les différents traitements ÉA-position et le traitement témoin (Tableau 8), alors que le traitement d'ÉA B/R+B+RL (5,57 %) a été supérieur au traitement ÉA B/R (5,15 %) (Tableau 10). Aucune différence n'a été observée entre ÉA UV (5,42 %) et ÉA B/R+RL+B+RL (5,26 %) ainsi que ces deux traitements et les autres traitements d'ÉA.

Pour la culture d'automne, aucune différence entre la fermeté, la conductivité électrique et l'acidité titrable des fruits soumis aux traitements d'ÉA-position et les fruits témoins n'a été observée (Tableau 9). Par contre, le pourcentage de matière sèche des fruits du traitement B/R-V a été inférieur de 14 % ( $P = 0,0193$ ) par rapport aux fruits témoins, alors que le contenu en solides solubles du traitement B/R+RL+B+RL-H a été de 9 % ( $P = 0,0323$ ) plus élevé que les fruits témoins (Tableau 9). D'autres part, des différences significatives entre les traitements d'ÉA ont été observées (Tableau 10). Ainsi, le contenu en solides solubles des fruits des traitements ÉA B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL a été plus élevé que les traitements ÉA UV et B/R, la CE des fruits soumis à ÉA UV a été plus élevée que ÉA B/R, B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL, alors que la masse sèche des fruits soumis à ÉA B/R+RL+B+RL a été plus élevée que ÉA UV, B/R et B/R+B+RL.

**Tableau 9 :** Mesures physico-chimiques moyennes (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des fruits soumis aux différents traitements d'ÉA ; H = horizontal, V = vertical au cours de deux périodes de culture.

Variable mesurée	Traitement									ETM	Valeur de P
	Témoin	UV		B/R		B/R + B + RL		B/R + RL + B + RL			
	T	H	V	H	V	H	V	H	V		
<b>Été</b>											
Fermeté	56,403	56,660	58,862	55,802	<b>60,188</b>	56,706	59,026	57,698	58,222	0,878	0,0015
Solides solubles (%)	4,267	<b>4,717</b>	4,517	4,350	4,408	4,442	<b>4,658</b>	4,433	<b>4,775</b>	0,094	0,0013
Conductivité électrique (mS/cm)	5,356	<b>5,994</b>	<b>6,070</b>	5,360	5,181	5,316	5,555	5,429	5,804	0,143	<0,0001
Acidité titrable (% acide citrique)	0,410	<b>0,499</b>	<b>0,517</b>	0,418	0,427	0,408	0,438	0,401	0,462	0,017	<0,0001
Masse sèche (%)	0,051	0,058	0,056	0,052	0,051	0,053	0,058	0,054	0,055	0,002	0,1470
<b>Automne</b>											
Fermeté	63,842	63,499	64,448	64,491	63,528	63,542	63,985	64,885	63,537	0,921	0,9307
Solides solubles (%)	4,458	4,483	4,533	4,433	4,408	4,725	4,825	<b>4,867</b>	4,817	0,094	0,0002
Conductivité électrique (mS/cm)	5,795	6,059	5,722	5,571	5,362	5,506	5,516	5,430	5,680	0,143	0,0279*
Acidité titrable (% acide citrique)	0,447	0,453	0,450	0,437	0,420	0,429	0,420	0,419	0,450	0,017	0,6421
Masse sèche (%)	0,060	0,055	0,054	0,054	<b>0,052</b>	0,056	0,057	0,062	0,063	0,002	<0,0001

Les valeurs en **gras** sont significativement différentes du témoin ; \* selon le test de Dunnett, aucune différence significative n'a été observée à P < 0,05.

**Tableau 10 :** Valeurs moyennes (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des paramètres de la qualité des fruits soumis à différents traitements d'ÉA au cours de deux saisons de croissance. Les valeurs sont la moyenne des deux positionnements des lampes puisqu'aucun effet de position n'a été observé, à l'exception de la fermeté. Un test LSD protégé a été effectué pour chacune des cultures puisqu'une interaction significative ÉA\*saison a été observée. Les lettres minuscules montrent les différences significatives entre les traitements ÉA pour la culture d'été alors que les lettres majuscules montrent les différences pour la culture d'automne.

	ÉA UV		ÉA B/R		ÉA B/R + B + RL		ÉA B/R + RL + B + RL	
	Été	Automne	Été	Automne	Été	Automne	Été	Automne
Fermeté	57,73	64,08	57,98	63,92	57,89	63,76	57,93	64,22
Solides solubles (%)	4,62 a	4,51 B	4,38 b	4,42 B	4,55 ab	4,78 A	4,60 a	4,84 A
CE (mS/cm)	6,03 a	5,89 A	5,27 c	5,47 B	5,43 bc	5,51 B	5,62 b	5,56 B
Ac. Titrables (% ac.cit.)	0,508 a	0,452	0,422 b	0,428	0,423 b	0,424	0,431 b	0,435
Matière sèche (%)	5,42 ab	5,42 B	5,15 b	5,27 B	5,57 a	5,61 B	5,46 ab	6,24 A

### 4.3.2 Nutriments

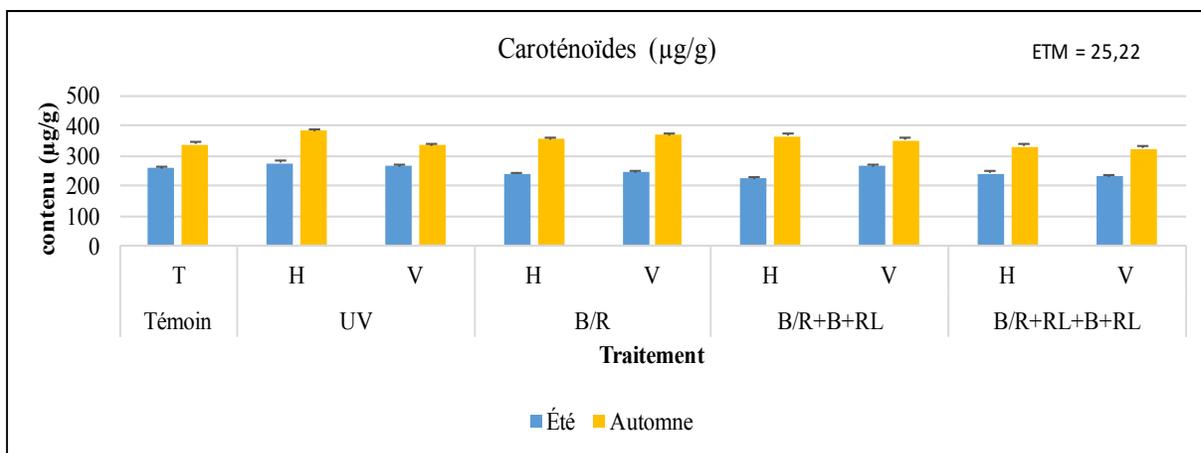
Effet de la saison - L'analyse statistique comparant les deux saisons de culture a montré des différences hautement significatives pour le total en  $\mu\text{g/g}$  des caroténoïdes (Figure 13), ainsi que pour l' $\alpha$ -carotène, le *trans*- $\beta$ -carotène, le *cis*- $\beta$ -carotène, le 13-*cis*-lycopène, *trans*-lycopène ( $P < 0,0001$ ), la lutéine ( $P = 0,0036$ ) et le 9-*cis*-lycopène ( $P = 0,0005$ ). La teneur des fruits en vitamine C et en phénols totaux, a également été affectée par la saison de culture (Figures 14 et 15). Pour le contenu en minéraux des fruits, à l'exception de l'azote (N) et du phosphore (P), tous ont démontré une différence significative entre les deux saisons de culture ( $P < 0,0001$ ) (Tableau 15).

Effet de l'ÉA - Les analyses de LSD protégées ont montré une différence significative entre les traitements d'ÉA pour les caroténoïdes, vitamine C et phénols totaux (Figures 13 à 15). Les fruits soumis au traitement ÉA UV avaient 7,14 % moins de vitamine C que les fruits soumis aux traitements ÉA B/R, B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL ; aucun effet n'a été observé entre ÉA B/R, B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL.

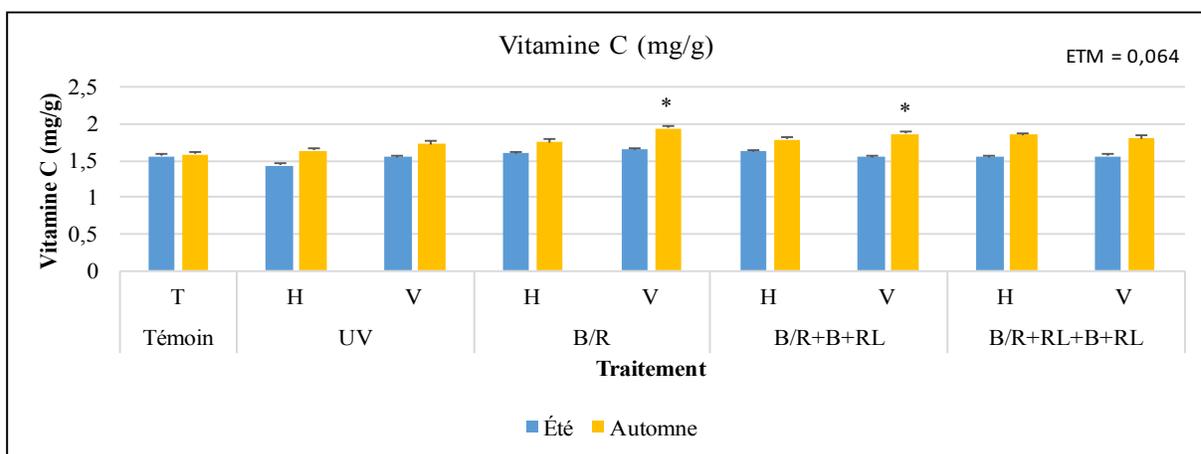
Lors de la culture d'été, aucune différence n'a été observée entre les traitements d'ÉA-position par rapport au témoin pour les caroténoïdes (Tableau 11), et la vitamine C (Figure 14). Toutefois, l'analyse LSD protégée montre des différences significatives entre les traitements d'ÉA durant l'été pour la lutéine et à l'automne pour le 9-*cis*-lycopène (Tableau 11). Pour la culture d'été, le traitement ÉA UV a eu un contenu en phénols totaux plus élevé que les traitements d'ÉA B/R (7 %), B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL (8 %) (Tableau 14).

Effet de l'ÉA et du positionnement des lampes : Quant au positionnement des lampes, seule la lutéine chez les caroténoïdes a été affectée significativement ( $P = 0,0260$ ) toutes saisons confondues, et plus précisément le traitement UV-H ( $P = 0,0044$ ). Les résultats pour les phénols totaux se sont avérés significatifs pour l'effet position horizontal vs vertical ( $P = 0,0176$ ) ainsi que pour la position X le traitement ( $P = 0,0086$ ), et ce pour le traitement horizontal lors des deux périodes de production, plus précisément le UV-H. L'acide homovanillique-*o*-hexoside a obtenu un résultat significatif pour l'effet position X saison ( $P$

= 0,0071) et plus précisément pour l'été (P = 0,0070) et la position des lampes a influencé l'acide coumaroylquinique (P = 0,0306) et ce, peu importe la saison de culture. Chez les minéraux, une différence significative a été observée pour le calcium (Ca) (P = 0,0016) à l'effet position X saison et plus spécifiquement pour la saison estivale (P = 0,0004).

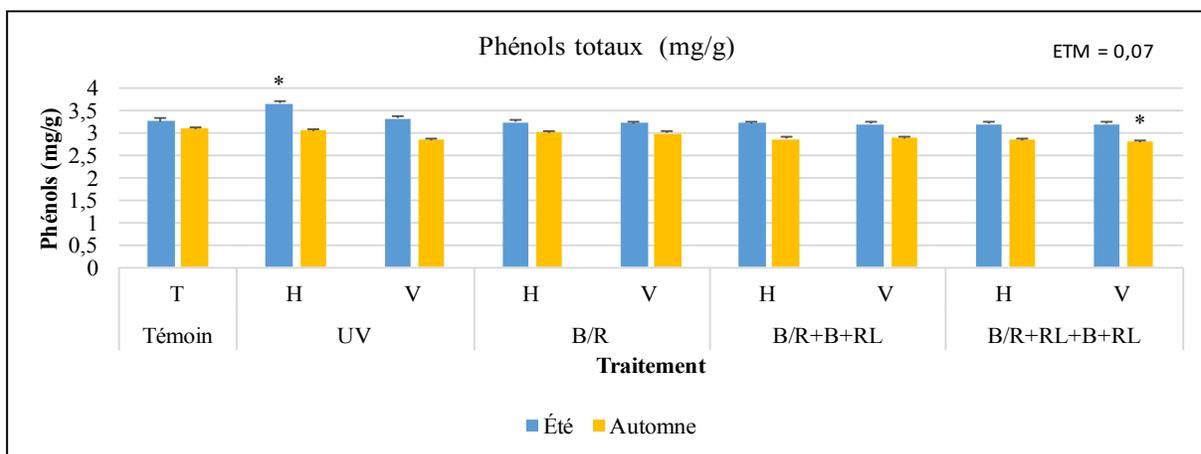


**Figure 14 :** Histogramme représentant le contenu moyen en caroténoïdes totales ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) des fruits des trois grappes étudiées des plants soumis aux traitements d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne), n = 12 (4 répétitions x 3 grappes).



\* Représente les valeurs significativement différentes du témoin

**Figure 15 :** Histogramme représentant le contenu moyen en vitamine C ( $\text{mg g}^{-1}$ ) des fruits des trois grappes étudiées des plants soumis aux traitements d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne), n = 12 (4 répétitions x 3 grappes).



\* Représente les valeurs significativement différentes du témoin.

**Figure 16 :** Histogramme représentant le contenu moyen des Phénols totaux ( $\text{mg g}^{-1}$ ) des fruits des trois grappes étudiées des plants soumis aux traitements d'ÉA (Témoin, UV, B/R, B/R+B+RL, B/R+RL+B+RL ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture (été, automne),  $n = 12$  (4 répétitions x 3 grappes).

Pour les phénols totaux, une différence significative a été observée entre les traitements d'ÉA-position et le témoin ( $P < 0,0001$ ) et plus précisément pour le traitement UV-H dont la moyenne était plus élevée de 12 % que les fruits témoins ( $P = 0,0017$ ) (Figure 15). Le Tableau 13 montre les effets des traitements d'ÉA-position sur le contenu des fruits en différents composés phénoliques, et ce par rapport aux fruits témoins cultivés au cours des deux saisons de culture.

Culture d'été - Ainsi, par rapport au témoin, l'acide férulique-*o*-hexoside des fruits à l'été, était plus élevé pour 5 des 8 traitements ; soit UV-H et UV-V de 43 % ( $P = 0,0023$ ) et 42 % ( $P = 0,0027$ ), B/R-V de 50 % ( $P = 0,0005$ ), B/R+B+RL-V de 34 % ( $P = 0,0206$ ) et B/R+RL+B+RL-V de 40 % ( $P = 0,0051$ ). Le contenu en acide caféique-*o*-hexoside était plus élevé de 38 % pour le UV-H ( $P = 0,0022$ ). L'acide coumaroylquinique était plus bas pour le B/R-V de 42 % ( $P = 0,0084$ ), le B/R+B+RL-V de 45 % ( $P = 0,0040$ ) et le B/R+RL+B+RL-H de 41 % ( $P = 0,0097$ ). Les acides 5 et 4-caféoylquinique étaient également plus élevés de 39 % ( $P = 0,0068$ ) et 70 % ( $P = 0,0030$ ) pour le traitement UV-H. La phlorétine-*c*-diglycoside était plus basse pour les traitements B/R-V de 28 % ( $P = 0,0460$ ), B/R+B+RL-V de 41 % ( $P = 0,0023$ ), B/R+RL+B+RL-H de 39 % ( $P = 0,0034$ ) et B/R+RL+B+RL-V de 33 % ( $P =$

0,0144). La rutine-*o*-pentoside était plus élevée pour UV-V de 70 % (P = 0,0247), B/R+B+RL-H et B/R+B+RL-V de 63 % (P = 0,0478) et 64 % (P = 0,0463) et B/R+RL+B+RL-H et V de 64 % (P = 0,0470) et 83 % (P = 0,0062). La phloridzine-*c*-diglycoside, était plus basse pour le B/R+RL+B+RL-H à 49 % (P = 0,0104) et le B/R+RL+B+RL-V à 42 % (P = 0,0374). Le kaempférol-3-*o*-rutinoside a montré des différences pour tous les traitements, soit un contenu plus bas (P < 0,0001) comparativement au témoin pour UV-H et B/R+RL+B+RL-V de 42 %, B/R-H de 40 % et B/R+B+RL-H de 45 % ; un contenu plus bas pour UV-V de 34 % (P = 0,0004), B/R-V et B/R+B+RL-V de 36 % (P = 0,0003), et B/R+RL+B+RL-H de 37 % (P = 0,0002). Les acides coumarique-*o*-hexoside 1 et 2 ont obtenu des résultats significatifs aux traitements UV, soit des contenus plus élevés de l'ordre de 31 % pour le UV-H (P = 0,0123) et de 26 % pour le UV-V (P = 0,0390) pour l'acide coumarique-*o*-hexoside 1 ; et de 307 % pour UV-H (P < 0,0001) et 213 % pour UV-V (P < 0,0001) pour l'acide coumarique-*o*-hexoside 2.

Le contenu en minéraux des fruits, ont montré des différences significatives par rapport au témoin, pour l'azote (N) et le potassium (K) (Tableau 15). En effet, le traitement d'ÉA-position UV-V était plus élevé par rapport au témoin de 17 % (P = 0,0106) pour le N et de 11 % (P = 0,0081) pour le K (Tableau 16).

Culture d'automne - Aucune différence entre les traitements d'ÉA-position n'a été observée pour le contenu en caroténoïdes (Tableau 11). Mais contrairement à la culture d'été, le contenu en vitamine C s'est avéré plus élevé que le témoin pour les traitements B/R-V de 22 % (P = 0,0055) et B/R+B+RL-V de 17 % (P = 0,0349) (Figure 14). Par rapport au témoin, les phénols totaux étaient plus bas pour le traitement B/R+RL+B+RL-V de 10 % (P = 0,0215). De plus, les fruits soumis à un traitement d'ÉA B/R avaient un contenu en phénols totaux plus élevé que les fruits soumis au traitement d'ÉA B/R+RL+B+RL (Figure 15). Plus spécifiquement, des teneurs plus faibles que celles du témoin ont été observées chez cinq des huit traitements, tel l'acide coumaroylquinique, de l'ordre de 46 % (P = 0,0228) pour B/R-V, de 44 et 51 % (P = 0,0329 ; 0,0107) pour B/R+B+RL-H et V, et de 33 et 46 % (P = 0,0102 ; 0,0244) pour B/R+RL+B+RL-H et V. La phlorétine-*c*-diglycoside avait des différences plus basses que le témoin pour trois traitements, soit B/R+B+RL-H et V de 47 % (P = 0,0154 ;

0,0161) et B/R+RL+B+RL-H de 41 % (P = 0,0398). L'acide coumarique-*o*-hexoside 2, était plus élevée de 59 % pour le traitement UV-V par rapport aux fruits témoins (P = 0,0067). Et finalement, le contenu des fruits en naringénine était plus faible pour les traitements d'ÉA B/R-V et le B/R+B+RL-V de 36 et 43 % (P = 0,0203 ; 0,0044) respectivement (Tableau 13).

Chez les minéraux, le K avait des teneurs plus faibles que le témoin pour le B/R+B+RL-H de 16 % et B/R+RL+B+RL-H de 19 % (P < 0,0001), et pour le B/R+B+RL-V de 14 % et B/R+RL+B+RL-V 13 % (P = 0,0003 ; 0,0013). Le P, laissait ressortir des résultats également plus bas que le témoin, pour B/R+B+RL-V de 14 % (P = 0,0163) et B/R+RL+B+RL-H et V de 15 et 12 % (P = 0,0078 ; 0,0350) (Tableau 15).

**Tableau 11** : Contenu moyen en caroténoïdes des fruits des trois grappes étudiées des plants (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) soumis aux différents traitements d'ÉA ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux périodes de culture (moyenne ; erreur type de la moyenne).

Variable mesurée (µg/g)	Traitement									ETM	Valeur de P
	Témoin	UV		B/R		B/R + B + RL		B/R + RL + B + RL			
	T	H	V	H	V	H	V	H	V		
<b>Été</b>											
<b>lutéine</b>	10,04	11,66	10,70	10,09	11,01	9,51	11,01	10,35	9,85	0,52	0,0928
<b>α-carotène</b>	19,65	19,42	18,46	18,91	18,29	17,34	19,71	19,05	17,05	2,33	0,9918
<b>trans-β-carotène</b>	14,92	16,06	15,07	14,86	15,76	13,37	15,50	14,89	13,54	2,98	0,9989
<b>cis-β-carotène</b>	13,05	13,15	12,99	12,69	13,09	12,45	13,53	13,34	11,99	3,81	1,0000
<b>13-cis-lycopène</b>	16,18	16,44	15,34	14,67	15,19	13,92	14,51	17,84	14,60	2,17	0,9412
<b>9-cis-lycopène</b>	6,18	7,22	6,60	5,67	5,92	5,38	6,21	5,81	5,72	0,45	0,0773
<b>trans-lycopène</b>	176,60	192,50	185,00	162,50	165,50	149,90	185,00	158,70	156,20	19,52	0,6781
<b>caroténoïdes</b>	256,60	276,40	264,10	239,30	244,80	221,90	265,40	240,00	228,90	25,22	0,7517
<b>Automne</b>											
<b>lutéine</b>	11,59	12,26	10,82	10,80	11,13	10,89	11,06	11,00	11,10	0,52	0,5788
<b>α-carotène</b>	29,49	33,00	28,45	26,46	31,61	29,62	29,31	29,93	30,24	2,33	0,6902
<b>trans-β-carotène</b>	39,44	42,91	37,01	41,66	42,27	43,70	41,64	38,54	38,09	2,98	0,6706
<b>cis-β-carotène</b>	30,10	32,88	28,49	26,93	32,09	28,88	28,91	29,25	30,58	3,81	0,9726
<b>13-cis-lycopène</b>	26,06	28,87	24,03	23,95	27,14	27,23	25,35	24,12	26,82	2,17	0,6782
<b>9-cis-lycopène</b>	6,63	7,47	7,11	6,79	6,79	6,82	6,64	6,46	6,23	0,45	0,6427
<b>trans-lycopène</b>	195,00	225,80	197,80	217,20	216,10	216,60	207,00	189,70	179,80	19,52	0,6537
<b>caroténoïdes</b>	338,30	383,20	333,80	353,80	367,10	363,80	349,90	329,00	322,90	25,22	0,6414

**Tableau 12 :** Contenu moyen en caroténoïdes des fruits des trois grappes étudiées (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des plants soumis à différents traitements d'ÉA au cours de deux saisons de culture. Les valeurs sont la moyenne des deux positionnements des lampes puisqu'aucun effet de position n'a été observé. Un test LSD protégé a été effectué pour chacune des cultures puisqu'une interaction significative ÉA\*saison a été observée. Les lettres minuscules montrent les différences significatives entre les traitements ÉA pour la culture d'été alors que les lettres majuscules montrent les différences pour la culture d'automne.

µg/g	ÉA UV		ÉA B/R		ÉA B/R + B + RL		ÉA B/R + RL + B + RL	
	Été	Automne	Été	Automne	Été	Automne	Été	Automne
lutéine	11,18 a	11,54	10,55 ab	11,05	10,26 ab	10,98	10,10 b	10,97
$\alpha$ -carotène	18,94	30,73	18,60	30,08	18,52	29,46	18,05	29,04
<i>trans</i> - $\beta$ -carotène	15,57	39,96	15,31	41,96	14,44	42,67	14,21	38,31
<i>cis</i> - $\beta$ -carotène	13,07	30,68	12,89	29,51	12,99	28,89	12,66	29,92
13- <i>cis</i> -lycopène	15,89	26,45	14,92	25,55	14,21	26,29	16,22	25,47
9- <i>cis</i> -lycopène	6,90 a	7,29 A	5,80 b	6,79 AB	5,79 b	6,73 AB	5,77 b	6,35 B
<i>trans</i> -lycopène	188,7	211,8	164,0	216,6	167,5	211,8	157,5	184,7
caroténoïdes	270,3	358,5	242,1	360,4	243,7	356,8	234,5	325,9

**Tableau 13** : Contenu moyen en composés phénoliques des fruits des trois grappes étudiées (n =12 ; 4 rép. x 3 grappes) soumis aux traitements d'ÉA (H = horizontal, V = vertical) lors de deux saisons de culture.

Varble mesurée (µg/g)	Traitement									ETM	Valeur de P
	Témoin	UV		B/R		B/R + B + RL		B/R + RL + B + RL			
	T	H	V	H	V	H	V	H	V		
<b>Été</b>											
A. homovanillique- <i>o</i> -hexoside	121,52	137,32	106,73	106,57	110,38	119,96	91,80	108,13	98,00	8,49	0,0115*
Acide férulique- <i>o</i> -hexoside	20,39	<b>29,16</b>	<b>29,04</b>	23,07	<b>30,53</b>	24,31	<b>27,25</b>	25,04	<b>28,49</b>	1,63	<0,0001
Acide caféique- <i>o</i> -hexoside 1	254,82	<b>352,44</b>	298,92	298,93	277,07	265,47	270,62	267,87	295,73	18,06	0,0023
Acide caféique- <i>o</i> -hexoside 2	167,22	168,53	153,95	163,87	158,87	156,68	140,26	159,68	154,48	8,13	0,2337
Rutine- <i>o</i> -hexoside	38,43	34,87	31,56	29,99	27,42	29,13	29,32	30,61	30,61	2,72	0,1532
Acide coumaroylquinique	38,28	37,68	29,30	33,09	<b>22,34</b>	27,79	<b>20,99</b>	<b>22,61</b>	28,39	3,34	<0,0001
Acide 3-caféoylquinique	6,91	5,63	5,61	5,09	5,01	5,07	5,37	6,33	5,58	0,50	0,0754
Acide 5-caféoylquinique	709,16	<b>988,47</b>	828,98	804,15	771,20	733,39	781,67	746,26	847,27	55,64	0,0150
Acide 4-caféoylquinique	22,35	<b>38,04</b>	31,77	32,34	31,49	29,52	31,67	28,10	31,28	2,86	0,0228
Phlorétine- <i>c</i> -diglycoside	255,41	273,66	229,89	213,82	<b>183,60</b>	184,76	<b>151,85</b>	<b>155,96</b>	<b>170,85</b>	17,52	<0,0001
Rutine- <i>o</i> -Pentoside	11,31	17,97	<b>19,22</b>	15,62	14,99	<b>18,48</b>	<b>18,52</b>	<b>18,50</b>	<b>20,68</b>	1,78	0,0111
Phloridzine- <i>c</i> -diglycoside	14,00	14,88	12,30	11,67	8,81	8,56	8,44	<b>7,08</b>	<b>8,17</b>	1,43	0,0001
Acide caféique	9,01	10,91	9,75	9,56	9,34	8,74	8,53	7,77	9,18	0,77	0,2147
Acide dicaféylquinique	5,31	5,14	4,80	5,37	5,11	4,75	4,70	5,07	4,73	0,42	0,9058
Kaempférol-3- <i>o</i> -rutinoside	113,75	<b>65,71</b>	<b>74,66</b>	<b>68,56</b>	<b>73,22</b>	<b>62,73</b>	<b>73,35</b>	<b>72,15</b>	<b>66,09</b>	6,02	<0,0001
A. coumarique- <i>o</i> -hexoside 1	36,58	<b>47,90</b>	<b>46,26</b>	35,97	30,26	32,30	31,29	32,61	41,16	2,64	<0,0001
A. coumarique- <i>o</i> -hexoside 2	14,18	<b>57,80</b>	<b>44,34</b>	10,69	13,62	12,12	14,44	12,69	19,74	2,12	<0,0001
Naringénine	34,28	70,63	33,64	20,15	18,02	16,77	14,79	12,76	22,84	20,39	0,5334
Rutine	502,50	485,61	475,87	428,92	410,50	460,06	444,93	468,17	443,10	29,17	0,4461
Phénols totaux (mg/g)	3,26	<b>3,66</b>	3,31	3,23	3,22	3,21	3,20	3,20	3,20	0,07	<0,0001
<b>Automne</b>											
A. homovanillique- <i>o</i> -hexoside	79,71	71,96	84,31	79,66	89,55	69,38	77,24	76,04	66,01	8,49	0,6457
Acide férulique- <i>o</i> -hexoside	17,14	14,85	16,09	17,22	17,35	16,43	15,51	16,27	15,98	1,63	0,9605
Acide caféique- <i>o</i> -hexoside 1	212,34	157,11	200,14	215,70	209,71	182,22	180,64	206,38	184,66	18,06	0,2054
Acide caféique- <i>o</i> -hexoside 2	143,46	131,15	134,66	138,72	141,84	133,87	130,28	138,44	127,71	8,13	0,8308
Rutine- <i>o</i> -hexoside	26,70	27,98	30,49	25,30	21,78	22,53	24,22	27,09	24,83	2,72	0,4333
Acide coumaroylquinique	30,40	28,91	22,32	18,71	<b>16,33</b>	<b>17,05</b>	<b>14,91</b>	<b>14,81</b>	<b>16,47</b>	3,34	0,0006
Acide 3-caféoylquinique	3,80	4,59	4,06	4,24	4,36	4,10	4,27	4,02	4,06	0,50	0,9823
Acide 5-caféoylquinique	625,76	606,20	566,51	593,72	590,61	579,22	492,79	550,09	540,84	55,64	0,8060
Acide 4-caféoylquinique	33,31	33,35	29,48	27,74	27,97	32,11	27,20	30,10	27,60	2,86	0,5760
Phlorétine- <i>c</i> -diglycoside	177,29	157,76	139,44	134,26	142,30	<b>93,48</b>	<b>93,92</b>	<b>103,81</b>	106,76	17,52	0,0049
Rutine- <i>o</i> -Pentoside	14,29	18,04	15,21	13,07	17,35	17,48	17,78	19,25	19,53	17,78	0,1305
Phloridzine- <i>c</i> -diglycoside	12,89	11,13	10,78	8,78	10,23	7,53	7,05	8,57	8,90	1,43	0,0724
Acide caféique	5,31	3,13	4,37	4,30	5,38	3,85	3,84	4,48	3,55	0,77	0,4297
Acide dicaféylquinique	5,83	6,47	5,82	6,45	6,74	5,88	4,97	5,07	5,46	0,42	0,0152*
Kaempférol-3- <i>o</i> -rutinoside	57,41	45,19	49,80	43,44	39,55	35,61	32,32	35,34	39,22	6,02	0,0540
A. coumarique- <i>o</i> -hexoside 1	22,64	15,93	16,17	17,11	15,05	12,47	12,07	15,41	12,97	2,64	0,0586
A. coumarique- <i>o</i> -hexoside 2	18,91	24,73	<b>30,02</b>	14,84	15,76	19,70	14,15	15,95	15,98	2,12	<0,0001
Naringénine	249,46	232,56	201,21	177,06	<b>160,79</b>	179,07	<b>143,15</b>	212,24	193,24	20,39	0,0027
Rutine	376,83	384,13	384,58	303,48	306,83	317,68	308,15	321,06	341,06	29,17	0,1908
Phénols totaux (mg/g)	3,09	3,05	2,85	3,00	2,99	2,86	2,88	2,85	<b>2,79</b>	0,07	0,0111

Les valeurs en **gras** sont significativement différentes du témoin ; \* selon le test de Dunnett, aucune différence significative n'a été observée.

**Tableau 14 :** Contenu moyen des composés phénoliques des fruits des trois grappes étudiées (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des plants soumis à différents traitements d'ÉA au cours de deux saisons de croissance. Les valeurs sont la moyenne des deux positionnements des lampes puisqu'aucun effet de position n'a été observé, à l'exception de l'acide coumaroylquinique et des phénols totaux. Un test LSD protégé a été effectué pour chacune des cultures puisqu'une interaction significative ÉA\*saison a été observée. Les lettres minuscules montrent les différences significatives entre les traitements ÉA pour la culture d'été alors que les lettres majuscules montrent les différences pour la culture d'automne.

µg/g	ÉA UV		ÉA B/R		ÉA B/R + B + RL		ÉA B/R + RL + B + RL	
	Été	Automne	Été	Automne	Été	Automne	Été	Automne
A. homovanillique- <i>o</i> -hexoside	122,03 a	78,14	108,47 ab	84,61	105,88 ab	73,31	103,06 b	71,03
Acide férulique- <i>o</i> -hexoside	29,10	15,47	26,80	17,29	25,78	15,97	26,77	16,12
Acide caféique- <i>o</i> -hexoside 1	325,68 a	178,63	288,00 b	212,71	268,05 b	181,43	281,80 b	195,52
Acide caféique- <i>o</i> -hexoside 2	161,24	132,90	161,37	140,28	148,47	132,08	157,08	133,07
Rutine- <i>o</i> -hexoside	33,21	29,23 A	28,71	23,54 B	29,23	23,38 B	30,61	25,96 AB
Acide coumaroylquinique	33,49 a	25,62 A	27,71 ab	17,52 B	24,39 b	15,98 B	25,50 b	15,64 B
Acide 3-caféoylquinique	5,62 ab	4,33	5,05 b	4,30	5,22 ab	4,19	5,95 a	4,04
Acide 5-caféoylquinique	908,73 a	586,36	787,67 b	592,16	757,53 b	536,01	796,77 ab	545,47
Acide 4-caféoylquinique	34,90	31,41	31,92	27,86	30,60	29,65	29,69	28,85
Phlorétine- <i>c</i> -diglycoside	251,78 a	148,60 A	198,71 b	138,28 AB	168,30 b	93,70 C	163,41 b	105,28 BC
Rutine- <i>o</i> -Pentoside	18,59 ab	16,62 AB	15,31 b	15,21 B	18,50 ab	17,63 AB	19,59 a	19,39 A
Phloridzine- <i>c</i> -diglycoside	13,59 a	10,96 A	10,24 b	9,51 AB	8,50 b	7,29 B	7,62 b	8,73 AB
Acide caféique	10,33 a	3,75	9,45 ab	4,84	8,63 b	3,85	8,47 b	4,02
Acide dicaféylquinique	4,97	6,15 AB	5,24	6,60 A	4,72	5,43 BC	4,90	5,27 C
Kaempférol-3- <i>o</i> -rutoside	70,18	47,49 A	70,89	41,50 AB	68,04	33,96 B	69,12	37,18 AB
A. coumarique- <i>o</i> -hexoside 1	47,08 a	16,05	33,11 b	16,08	31,80 c	12,27	36,88 b	14,19
A. coumarique- <i>o</i> -hexoside 2	51,07 a	27,37 A	12,16 b	15,30 B	13,28 b	16,92 B	16,21 b	15,97 B
Naringénine	52,14	216,89 A	19,09	168,92 B	15,78	161,11 B	17,79	202,74 AB
Rutine	480,74 a	384,35 A	419,71 b	305,16 B	452,50 ab	312,91 B	455,64 ab	331,06 AB
Phénols totaux (mg/g)	3,49 a	2,95 AB	3,23 b	3,00 A	3,20 b	2,87 AB	3,20 b	2,82 B

**Tableau 15** : Contenu moyen en minéraux des fruits des trois grappes étudiées (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des plants soumis aux différents traitement d'ÉA ; H = horizontal, V = vertical) lors de deux périodes de production (moyenne ; erreur type de la moyenne).

Variable mesurée (mg/kg)	Traitement									ETM	Valeur de P
	Témoin	UV		B/R		B/R + B + RL		B/R + RL + B + RL			
	T	H	V	H	V	H	V	H	V		
<b>Été</b>											
Calcium	1046,65	1124,39	975,51	1061,01	1023,38	1109,23	959,55	1069,83	869,16	54,50	0,0242*
Magnésium	1346,97	1455,89	1516,61	1366,31	1273,07	1343,83	1384,31	1442,23	1380,68	51,46	0,0548
Potassium	45417	47310	<b>50512</b>	45960	44212	42397	44216	42969	43764	1249,74	<0,0001
Cuivre	22,25	23,45	24,14	22,53	20,65	18,30	23,42	23,05	26,25	2,47	0,5278
Fer	82,64	82,65	78,59	85,90	83,42	76,93	91,80	82,97	82,77	5,11	0,7064
Manganèse	18,13	19,58	18,97	18,05	16,49	17,67	18,69	18,57	16,89	0,97	0,4069
Zinc	33,78	36,28	35,65	33,43	31,95	29,11	34,70	32,66	37,13	2,36	0,3640
Phosphore	5876,13	6310,69	6278,41	5683,03	5593,11	5617,26	5616,52	5660,65	5572,79	185,49	0,0134*
Azote (% p/p sec)	2,26	2,51	<b>2,63</b>	2,35	2,17	2,28	2,40	2,32	2,42	0,07	0,0010
<b>Automne</b>											
Calcium	800,19	735,71	829,62	873,04	913,20	852,21	810,73	752,72	804,65	54,50	0,3658
Magnésium	1180,85	1100,49	1087,88	1115,95	1097,81	1157,94	1096,14	1065,36	1208,61	51,46	0,5457
Potassium	47826	47840	45179	45401	44559	<b>40071</b>	<b>40935</b>	<b>38952</b>	<b>41686</b>	1249,74	<0,0001
Cuivre	10,64	9,74	11,03	9,61	10,79	10,12	9,66	10,07	9,51	2,47	0,9999
Fer	68,03	64,20	66,16	66,18	73,28	65,55	65,82	67,25	66,82	5,11	0,9789
Manganèse	15,32	13,81	13,49	14,41	14,44	15,94	14,23	14,57	15,50	0,97	0,6994
Zinc	27,43	25,79	25,29	25,02	26,06	25,66	25,53	25,02	25,68	2,36	0,9993
Phosphore	6461,05	6321,17	5989,94	6063,16	5891,51	5726,17	<b>5579,6</b>	<b>5498,46</b>	<b>5667,83</b>	185,49	0,0022
Azote (% p/p sec)	2,52	2,49	2,26	2,30	2,36	2,31	2,31	2,26	2,44	0,07	0,0911

Les valeurs en **gras** sont significativement différentes du témoin ; \* selon le test de Dunnett, aucune différence significative n'a été observée.

**Tableau 16 :** Contenu moyen en minéraux des fruits trois grappes étudiées (n = 12 ; 4 répétitions x 3 grappes) des plants soumis à différents traitements d'ÉA au cours de deux saisons de croissance. Les valeurs sont la moyenne des deux positionnements des lampes puisqu'aucun effet de position n'a été observé. Un test LSD protégé a été effectué pour chacune des cultures puisqu'une interaction significative ÉA\*saison a été observée. Les lettres minuscules montrent les différences significatives entre les traitements ÉA pour la culture d'été alors que les lettres majuscules montrent les différences pour la culture d'automne.

mg/kg	ÉA UV		ÉA B/R		ÉA B/R + B + RL		ÉA B/R + RL + B + RL	
	Été	Automne	Été	Automne	Été	Automne	Été	Automne
Calcium	1049,95	782,66 B	1042,20	892,12 A	1034,39	831,47 AB	969,49	778,69 B
Magnésium	1486,25 a	1094,19	1319,69 b	1106,88	1364,07 b	1127,04	1411,45 ab	1136,98
Potassium	48911 a	46510 A	45086 b	44980 A	43307 b	40503 B	43366 b	40319 B
Cuivre	23,80	10,39	21,59	10,20	20,86	9,89	24,65	9,79
Fer	80,62	65,18	84,66	69,73	84,37	65,68	82,87	67,03
Manganèse	19,29	13,65	17,27	14,43	18,18	15,08	17,73	15,03
Zinc	35,97	25,54	32,69	25,54	31,90	25,60	34,89	25,35
Phosphore	6294,55 a	6155,56 A	5638,07 b	5977,33 AB	5616,89 b	5652,88 BC	5616,72 b	5583,15 C
Azote (% p/p sec)	2,57 a	2,38	2,25 a	2,33	2,34 b	2,31	2,37 b	2,35

## 5. DISCUSSION

### 5.1 Effets des traitements lumineux sur la croissance

#### *5.1.1 Hebdomadaire*

Le rayonnement solaire est le facteur ayant le plus grand impact sur la culture de la tomate (Dorais et al., 2008), et au Québec comme les mois d'hiver sont beaucoup plus sombres que ceux d'été, cela affecte les taux de photosynthèse de la plante et donc les paramètres de croissance des plantes. Comme les UV étaient d'une intensité relativement forte au cours de la culture d'été (Annexe 1), ceci a résulté en des dommages foliaires affectant négativement certains paramètres de croissance de la plante tels que la longueur de feuille, le diamètre de tige, la surface foliaire et les masses fraîches et sèches des feuilles. Ce point avait également été rapporté par Hideg et al. (2013) dans son étude sur le stress causé par les UV, montrant qu'une exposition à diverses intensités de radiations UV mène à la libération de radicaux libres pouvant endommager l'ADN, les protéines, les lipides, les chloroplastes et les pigments photosynthétiques des plantes.

Pour les autres traitements d'ÉA vs les paramètres, on peut considérer que la différence observée entre les moyennes générales des deux saisons de culture était probablement liée aux conditions différentes d'éclairage naturel (été = haute intensité ; automne = faible intensité). Par contre, pour les saisons prises individuellement, les résultats allaient dans le même sens que Pepin et al. (2014), soit que la supplémentation intra-canopée en DEL par rapport aux plantes témoins a peu d'effets sur les paramètres de croissance des plantes, tels l'élongation et le diamètre de tige, ainsi que la longueur de feuille en comparaison du témoin. Par contre, au cours de l'été, l'utilisation d'un ÉA UV ( $20 \text{ kJ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ ) a réduit le diamètre de tige et la longueur de feuille par rapport aux autres traitements d'ÉA étudiés utilisant des DEL B/R bidirectionnelles enrichies et non en B et RL, alors qu'un ÉA UV a augmenté l'élongation hebdomadaire de la tige. Ces résultats sont en partie en accord avec certains travaux précédent démontrant que l'utilisation d'un ÉA UV-B amenait une inhibition de l'expansion des feuilles (Wargent et al., 2009), alors que Shinkle et al. (2004) a plutôt observé une réduction de l'élongation des tiges. Par ailleurs, l'utilisation d'un ÉA UV plus faible à

l'automne ( $6 \text{ kJ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$  vs  $20 \text{ kJ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ ) a aussi augmenté l'élongation de la plante, mais également le diamètre de tige et la longueur de feuille par rapport à un ÉA B\R+B+RL. Ces résultats corroborent les observations de Wargent (2016) rapportant que l'utilisation modérée d'un ÉA DEL-UV peut induire des réponses morphologiques et physiologiques souhaitables, entre autres sous l'influence du photorécepteur UVR8, pour les cultures en serre.

### *5.1.2 Biomasse*

Il est connu que la qualité spectrale de la lumière influence la croissance et le développement des plantes via les différents photorécepteurs (Huché-Téliér, 2016 ; Galvão et Fankhauser, 2015) et que la production de biomasse est directement dépendante de la quantité de radiation photosynthétique reçue par les feuilles et du taux de photosynthèse de la canopée végétale (Bugbee, 2016). L'ajout de lumière bleu intra-canopée est connu pour augmenter la biomasse de la masse sèche des tiges et des feuilles de tomate et de concombre (Ménard et al., 2006). En effet, pour les deux essais, seuls les traitements avec de la lumière bleue ajoutée (ÉA B/R, B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL) ont systématiquement montré une augmentation de ces variables par rapport aux plantes témoins (Tableau 5). Selon Olle et Virsilé (2013), la lumière rouge n'a pas d'effet marqué sur la biomasse de la laitue et autres légumes verts lorsqu'utilisée seule, en supplément de la lumière naturelle ou artificielle tels HPS et fluorescents, contrairement à son utilisation en combinaison avec le rouge lointain qui a augmenté leur biomasse. Selon Desmotes-Mainard et al. (2016), tout comme les résultats obtenus dans cette étude, des plants de concombre et de tomate sous traitement B:R:RL ont montré une augmentation de la masse sèche, mais cet accroissement chez Hogewoning et al. (2012) était plus particulièrement importante au niveau des tiges, et c'est ce qui s'est passé de façon significative pour la masse sèche de cette partie de plante pour nos deux saisons de culture. Même si la surface foliaire ne s'est avérée significative que pour le traitement ÉA B/R de la culture d'été (mai à août) par rapport aux plantes témoins, de façon générale cette variable était plus élevée pour tous les traitements DEL que le témoin (Tableau 6) pour cette saison, mais non pour la culture d'automne (septembre 2015 à janvier 2016) ; ce qui pourrait être lié à la proportion plus grande de lumière naturelle (Hogewoning et al., 2012). Aussi, selon Génard et al. (2010), une diminution de la charge de fruit favorise l'accumulation de

matière sèche chez ceux-ci et donc la masse. Effectivement, la moyenne générale de la masse sèche des fruits pour la culture d'automne était significativement plus élevée par rapport à la culture d'été, alors qu'aucun effet des traitements d'ÉA n'a été observé. Par ailleurs, lorsque les traitements d'ÉA sont comparés entre eux, l'apport de RL a augmenté la longueur des entre-nœuds des plantes cultivées en été, alors qu'il a augmenté la masse sèche des tiges des plantes cultivées en automne. Hao et al. (2016) ont également observé qu'une supplémentation en rouge lointain augmentait l'élongation des tiges et que les plantes avaient donc une taille plus élevée.

## 5.2 Effets des traitements lumineux sur le rendement

### *5.2.1 Délai de développement des fruits*

Les plantes perçoivent des signaux de leur environnement qui les rendent apte à s'adapter et à modifier leur cycle biologique, et les différentes longueurs d'ondes lumineuses sont parmi ces signaux (Desmotes-Mainard et al., 2016). Toujours selon cette étude, la floraison serait accélérée sous un faible ratio R:RL, et pour ce qui est de la durée de développement des fruits, c'est-à-dire la maturation des fruits, il est clair que l'ajout de DEL a diminué la durée de développement des fruits, et ce jusqu'à un peu plus de 7 jours pour le traitement ÉA B/R+RL+B+RL. Même si pour la deuxième période les résultats ne sont pas aussi significatifs, on peut tout de même observer (Figure 9) une tendance générale pour une diminution avec les traitements ÉA DEL. Un temps réduit pour le développement des fruits, voilà un aspect intéressant pour les producteurs. Par contre, l'ajout d'un ÉA UV n'a pas influencé le délai de maturité des fruits par rapport aux fruits témoins et a augmenté ce nombre de jours par rapport aux autres traitements d'ÉA DEL. Nos résultats sont en accord avec les résultats de Lee et al. (2014) qui avaient observé qu'une supplémentation en DEL rouge et bleu avait permis de récolter les fruits jusqu'à 17 jours plus tôt et d'accroître le rendement hâtif de 2,6 fois comparativement à une culture où il n'y avait pas d'éclairage artificiel.

## 5.2.2 Récolte

Comme la radiation solaire naturelle et la charge en fruits n'était pas la même pour les deux saisons (été = 5/grappe, automne = 4/grappe ; ajustée en fonction de la radiation naturelle), des différences entre les saisons ont été observées. Pour la variable nombre de fruits, on remarque une légère augmentation pour les deux périodes (Figure 10), et plus particulièrement pour la culture d'été qui avait obtenu une valeur de  $P = 0,0065$  pour les traitements d'ÉA versus le témoin, même si aucune valeur pour un traitement DEL en particulier n'est ressortie significative. Ces résultats sont en accord avec Pepin et al. (2014). Par contre, les traitements DEL ont nettement amélioré la masse fraîche des fruits par rapport aux fruits témoins, et cet effet a été plus importante lors de la culture d'été. Similairement, le calibre moyen des fruits des plantes soumises à certains traitements ÉA DEL (B/R et B/R+B+RL) a été plus élevé que les fruits témoins. Et ici encore, même si pour la culture d'automne, aucun résultat significatif par rapport au témoin n'a été observé, visuellement et statistiquement (Saisons x Trts ÉA-position combinés), en observant les Figures 11 et 12, on peut voir une tendance positive pour cette période. En accord avec cette étude, une augmentation de la masse des fruits sous traitements DEL bleu et rouge a été observée par Lu et al. (2012), Guo et Wang (2010), Kumar et al. (2016). Et tout comme Hao et al. (2016), l'apport de RL a augmenté la masse des fruits, mais pas leur calibre.

## 5.3 Effets des traitements lumineux sur la qualité des fruits

### *5.3.1 Physico-chimie*

Par rapport aux fruits témoins, la culture d'été a montré plusieurs effets significatifs du traitement UV sur le contenu des fruits en solides solubles (SS), conductivité électrique (CE) et acidité titrable (AT). Malgré que le traitement d'ÉA UV ait eu un effet négatif sur le développement de la plante au cours de la culture d'été, l'utilisation d'un ÉA UV a augmenté, par rapport aux fruits témoins, le contenu des fruits en solides solubles, acides organiques et minéraux, exprimés par la CE. De plus, ces critères de qualité ont également été plus élevés chez les fruits soumis à un ÉA UV par rapport aux autres traitements d'ÉA.

L'aspect physique des fruits était différent entre les deux saisons de culture. La peau des fruits de la culture d'été était en général plus mince et plus susceptible au fendillement, comparativement à la culture d'automne où elle avait un aspect beaucoup plus ferme et épaisse. Effectivement, les données de fermeté des fruits étaient plus élevées pour la culture automnale. Ceci peut s'expliquer par une plus grande fréquence de l'irrigation causée par des températures élevées lors de certaines journées estivales, particulièrement chaudes en 2015. La variable fermeté a montré l'une des rares différences de l'étude entre le positionnement des lampes « horizontal vs vertical », et ce pour la culture d'été où tous les fruits des traitements d'ÉA verticaux étaient plus fermes que les traitements similaires d'ÉA horizontaux. Par contre, aucun effet n'a été observé lors de la culture d'automne. Il sera ainsi pertinent d'effectuer des essais complémentaires afin de voir si cet effet se maintient.

Concernant les paramètres reliés à la qualité organoleptique des fruits, comme les sucres sont synthétisés majoritairement au niveau des feuilles matures, via la photosynthèse qui se déroule dans les chloroplastes, puis transloqués aux fruits ; les traitements lumineux intra-canopée pourraient avoir une influence sur le contenu des solides solubles et autres métabolites des fruits. En effet, pour les deux saisons de culture, l'ajout de RL a augmenté le contenu des fruits en solides solubles par rapport aux fruits témoins (Tableau 9). De plus, l'ajout de RL (ÉA B/R+RL+B+RL) par rapport au traitement d'ÉA B/R a augmenté le contenu des fruits en solides solubles. L'enrichissement en RL (ÉA B/R+RL+B+RL) au cours de la culture d'automne a également augmenté le pourcentage de matière sèche des fruits par rapport aux autres traitements ÉA. Par ailleurs, Bian et al. (2015) rapportent qu'en général chez les légumes, la lumière bleue et le rouge sont plus efficaces pour augmenter la concentration en solides solubles que les autres types d'ÉA DEL, alors que Lu et al. (2012) rapportent qu'aucune amélioration significative n'a été observée chez la tomate par l'utilisation d'un ÉA bleu ou rouge. Similairement à Lu et al. (2012) lors de notre étude, l'utilisation d'un ÉA B/R a eu peu d'effet sur la qualité physico-chimique des fruits telle que décrite au Tableau 9, à l'exception de ÉA B/R-V. En ce qui concerne le RL, puisque l'effet s'est maintenu au cours des deux essais, il semble que l'ajout de RL pourrait contribuer à améliorer le contenu en solides solubles. Tout comme pour la masse sèche des fruits, la charge en fruits plus faible pour la culture d'automne pourrait expliquer la différence

significative entre les moyennes générales des deux saisons (Génard et al., 2010).

La conductivité électrique qui nous indique la concentration en minéraux dissous dans les échantillons, suit normalement la tendance des sucres solubles, c'est-à-dire plus élevée pour la culture d'automne. Toutefois, la CE des fruits soumis à un ÉA DEL n'a pas été différent de la CE des fruits témoins. Par ailleurs, la CE des fruits exposés aux UV a été plus élevée que la CE des fruits exposés aux autres traitements d'ÉA. De plus, l'ajout de RL lors de la culture d'été a augmenté la CE des fruits par rapport au traitement d'ÉA B/R.

La concentration en acides organiques, tout comme celle des sucres solubles, évolue au cours du développement du fruit. Les concentrations augmentent pendant la croissance de ce dernier pour diminuer fortement lors de la maturation (Génard et al., 2010). Comme les fruits ont tous été cueillis au même stade de maturité selon les paramètres de couleur L\*a\*b\* (Annexe 2), on peut conclure à un effet des traitements sur le pourcentage d'acidité titrable et des sucres solubles des fruits. Par contre, par rapport aux fruits témoins, il y a seulement eu un effet positif pour les fruits soumis aux traitements d'ÉA UV durant la culture d'été.

Pour le pourcentage de matière sèche, dont la moitié correspond aux sucres solubles (glucose, fructose) et environ 25 % aux acides organiques (malique, citrique) (Prudent, 2009), le traitement B/R s'est avéré significativement plus faible que le témoin à l'automne (Tableau 8).

### 5.3.2 *Nutriments*

La plupart des métabolites ont des teneurs qui évoluent avec le développement et la maturation des plantes et des fruits (Génard et al., 2010 ; Gautier et al., 2008). Certains ont tendance à s'accumuler et d'autres à se transformer au cours de ces processus (Gautier et al., 2008). Les traitements d'ÉA n'ont pas affectés significativement la vitamine C au cours de l'été alors que les traitements d'ÉA DEL en automne ont augmentés leur teneur en vitamine C (Figure 14). La plus faible concentration des fruits récoltés en été par rapport aux fruits récoltés en automne peut être expliqué par une température estival élevée favorisant la

dégradation par oxydation. De plus, une surface foliaire et une charge en fruits plus élevées en été par rapport à l'automne ont probablement contribué également à une plus faible teneur en vitamine C (Gautier et al., 2009). Ainsi, même si la lumière n'est pas essentielle pour la synthèse de la vitamine C, la quantité et l'intensité de la lumière durant la saison de croissance influence la quantité d'acide ascorbique (Dorais et Ehret, 2008) ; l'essentiel de son accumulation étant dépendant du microclimat lumineux du fruit (Gautier et al., 2009). Pour ce qui est de la qualité spectrale, il a été démontré que la lumière bleue et rouge améliorent le contenu en vitamine C (Labrie et Verkerke, 2014 ; Bian et al., 2015).

Similairement à la vitamine C, la lumière n'est pas essentielle pour le déclenchement de la formation des caroténoïdes, elle joue cependant un rôle déterminant sur son contenu (Dorais et al., 2008). Toutefois, aucune différence significative entre les différents traitements lumineux et le témoin n'a été observée lors de cette étude (Tableau 11). Par contre, d'une saison à l'autre, la différence a été significative (Figure 13), soit plus élevée pour la culture automnale. Cela peut s'expliquer par le fait que la biosynthèse des caroténoïdes est sous la dépendance de la température. Par exemple, la température moyenne la plus favorable à la synthèse du  $\beta$ -carotène est inférieure à 16,5 °C pour le brocoli, et de 18 °C pour la carotte, et chez la tomate les températures inférieures à 12 °C ou supérieures à 32 °C inhibent la synthèse de lycopène (Combris et al., 2007). De plus, comme rapporté par Génard et al. (2010), la concentration en lycopène, dont la synthèse est inhibée à forte température, est souvent plus élevée en hiver. Pour les traitements lumineux, plusieurs études ont démontré des effets importants sur la biosynthèse et l'accumulation des caroténoïdes chez les légumes, soumis à une lumière bleu, rouge et UV-B, bien que cette amélioration varie en fonction de l'espèce et du cultivar (Bian et al., 2015). En ce qui concerne la lutéine en lien avec l'analyse de positionnement H vs V, il semblerait qu'elle soit significativement supérieure pour l'horizontal mais ce uniquement pour le traitement UV. Ce qui est intéressant dans ce cas-ci, c'est que cet effet est valide pour les deux saisons, et ce même si nous avons grandement diminué les temps d'illumination pour la seconde période (Annexe 1). Il apparaît de plus, que le traitement UV horizontal soit le meilleur en ce qui a trait au contenu en caroténoïdes totaux.

Les composés phénoliques sont un très vaste ensemble de substances dont certaines servent à la défense des végétaux. Dans ce cas-ci, ceux qui nous intéressaient étaient surtout des polyphénols comme les flavonoïdes qui sont des antioxydants chez les végétaux. Chez la plante, ils contrôlent l'effet négatif des UV en neutralisant les radicaux libres et aideraient contre les stress environnementaux. C'est donc sans grande surprise que nous avons observé des différences hautement significatives chez la plupart des composés analysés, mais principalement d'une saison par rapport à l'autre (Figure 15). Ceci peut s'expliquer par le fait qu'un stress thermal peut induire l'accumulation de composés phénoliques comme les flavonoïdes, et nous en avons eu quelques-uns durant l'été 2015. En effet, à 35 °C le niveau de polyphénols peut doubler comparativement à 25 °C, et ce phénomène est considéré comme étant un mécanisme d'acclimatation (Helyes et Lugasi, 2006). Par contre, quelques-uns des composés étaient généralement plus élevés pour la culture d'automne, tels l'acide dicaféylquinique, et la naringénine. Comme les plantes produisent des polyphénols pour se protéger des dommages causés par les radiations de basses longueurs d'ondes telles les UV et le bleu, 8 composés analysés pour la culture d'été ont augmentés par rapport au témoin sous traitements UV, contre un seul significatif pour la culture d'automne où nous avons diminué le temps d'illumination (Tableau 13). Selon Galvão et Fankhauser (2015), en réponse à une haute intensité lumineuse et aux UV-B qui représentent un danger pour l'intégrité de la plante, cette dernière prévient les dommages en synthétisant des pigments photoprotecteurs grâce à l'utilisation du photorécepteur UVR8 qui lui permet de s'adapter à ces effets nuisibles. Les traitements DEL pour la culture d'été, ont fait augmenter de façon significative le contenu de deux d'entre eux, soit l'acide férulique-*o*-hexoside et la rutine-*o*-pentoside. Pour la culture d'automne, rien de significatif par rapport au témoin n'a été observé. Des composés ont également subi une baisse de leur concentration, et pour les DEL, cette diminution est assez semblable pour les deux périodes, mais hautement significative à l'été pour l'acide coumaroylquinique et la phlorétine-*c*-diglycoside ainsi que significative à l'automne. Le kaempférol a obtenu des baisses hautement significatives pour tous les traitements incluant les UV pour la culture d'été, mais même si rien de significatif n'est ressorti pour la culture d'automne, il s'avère tout de même que tous ces résultats étaient plus bas que le témoin. Au cours de cette étude, nous avons observé que les phénols totaux, ont été plus élevés en été pour les fruits soumis au traitement UV alors que les doses

supplémentaires de RL ont réduit leur teneur pour la culture d'automne. L'été, l'environnement était plus hostile, et les contenus généralement plus élevés. L'accumulation de métabolites secondaires semblaient être plus limitée par le métabolisme primaire en période plus froide à l'automne. Ceci pourrait expliquer le fait que les échantillons de l'automne avaient moins de différences entre les traitements; c'est-à-dire que la photosynthèse était limitée par l'intensité lumineuse généralement moins forte (en dépit de l'apport en lumière des traitements), ce qui aurait diminué l'allocation du carbone aux métabolites secondaires. Ce point pourrait être intéressant à exploiter pour les producteurs, ce qui leur permettrait de favoriser certains composés plus intéressants que d'autres. Il est clair toutefois que les photorécepteurs sont impliqués dans la réponse des traitements lumineux par les plantes (Galvão et Fankhauser, 2015 ; Huché-Thélier, 2016). Pour l'analyse du positionnement des lampes, le UV-H se distingue clairement des autres traitements d'ÉA pour la culture d'été (Figure 15). Même si pour la culture d'automne les effets ne sont pas aussi importants, on remarque tout de même que le traitement UV-H est aussi légèrement plus élevé que le traitement UV vertical. Cet effet favorable du UV-H a également été observé pour la lutéine.

Les fruits contiennent plusieurs minéraux, et leur contenu peut être influencé par les conditions environnementales, dont la lumière (Dorais et Ehret, 2008). À l'exception de N et du P, des différences ont été observées entre les deux saisons. Selon Dorais et Ehret (2008), la saison de production aurait un effet sur le contenu en minéraux des fruits. En général, leur concentration a augmenté par rapport au témoin sous les traitements UV à la culture d'été, et de façon significative pour le N et le K ; puis diminuer par rapport au témoin à la culture d'automne. Selon Desmotes-Mainard et al. (2016), la combinaison R:RL aurait la plus grande influence sur le contenu en minéraux des tomates et plus particulièrement pour les N, K et P. C'est effectivement les traitements ayant cette combinaison qui ont montré les résultats significatifs les plus importants, et plus spécifiquement à la culture d'automne pour le K et le P (Tableau 15). L'analyse du positionnement des lampes montre une différence significative entre la position horizontale et verticale pour la teneur des fruits en calcium. Le Tableau 15 fait ressortir le Ca comme étant systématiquement plus élevé que le témoin pour les traitements de position H, et plus basse pour la V à la culture d'été. Par contre, rien de tel

n'a été observé à l'automne.

## 6. CONCLUSION

Les plantes ont de multiples récepteurs pour détecter et répondre aux changements dynamiques de la composition spectrale d'un large éventail de photons (UV-B à rouge lointain), de la quantité de lumière et de la photopériode. Appliquer une supplémentation de lumière en temps et en localisations précises (ex. intra-canopée) aide à optimiser l'énergie utilisée, et la manipulation de l'environnement lumineux favorise la synthèse de certains métabolites primaires et secondaires. Une meilleure compréhension des interactions entre les photons du spectre lumineux ainsi que de leurs interactions avec la lumière naturelle et les autres conditions de culture telles la température et le cultivar, est nécessaire à l'optimisation de l'ÉA, puisque tous jouent un rôle important sur la qualité des fruits. En effet, le choix du cultivar est important, des variations du simple au double sont fréquemment observées chez certains composés. Dans ce cas-ci, le cv. Trust a été utilisé suite à son contenu modéré en nutriments.

Malgré que les avantages de l'utilisation d'un ÉA DEL pour accroître la productivité et la qualité des fruits aient été démontrés dans cette étude (diminution du temps de développement des fruits, augmentation du calibre et de certains nutriments), le coût d'achat élevé de ces luminaires limite leur utilisation par les producteurs, et ce, malgré l'augmentation de l'utilisation de l'ÉA à l'échelle internationale afin de combler la demande croissante des consommateurs pour des produits frais et locaux à l'année. La culture de fruits et légumes sous un système hybride d'ÉA HPS-DEL permettrait par ailleurs un produit ayant une haute valeur nutritionnelle tout en réduisant la consommation énergétique.

Ce projet a permis de vérifier deux de nos hypothèses de recherche. Soit que les fruits exposés à un ÉA DEL/UV positionné à l'intérieur de la canopée végétale ont une qualité et une valeur nutritionnelle plus élevées que les fruits exposés à un ÉA HPS conventionnel (au-dessus des plantes), à l'exception d'un effet d'un ÉA DEL/UV sur la teneur des fruits en caroténoïdes et la spécificité de l'effet d'un ÉA UV pour certains composés. Que le contenu des fruits en composés bénéfiques pour la santé humaine varie en fonction de la qualité spectrale de l'ÉA, la lumière UV ayant un impact plus important qu'un ÉA rouge et bleu. Par contre, bien que

la période de production (été vs automne) affecte la réponse des fruits à un ÉA DEL/UV, il y a eu plus d'effet significatif durant l'été que l'automne. Cela a probablement été dû à une dose plus importante de UV en été qu'à l'automne qui a affecté la croissance des plantes ainsi que leur contenu en composés phénoliques. Par ailleurs, un ÉA intra-canopée l'été a également été bénéfique puisque la durée de développement des fruits a été plus courte par rapport aux fruits témoins et que ceux-ci avaient une masse totale plus élevée. De plus, certains traitements d'ÉA au courant de l'été ont augmenté la qualité physico-chimique des fruits par rapport aux fruits témoins, malgré qu'aucun effet significatif n'ait été observé pour les caroténoïdes, la vitamine C et les phénols totaux. Cette étude a d'invalidé l'idée voulant que le positionnement des lampes affecte la réponse des fruits à un ÉA DEL/UV, les plantes exposées à un ÉA plus important (positionnement vertical des lampes) bénéficiant davantage d'un ÉA DEL/UV que les fruits produits sous un ÉA horizontal. Ainsi, un ÉA DEL a eu un effet bénéfique sur la biomasse des plantes, le rendement, le calibre, le délai de maturité des fruits, leur contenu en sucres solubles et en vitamine C. Un ÉA UV a eu un effet bénéfique sur le contenu des fruits en phénols totaux et en certains composés phénoliques, en sucres solubles et en acides organiques. Ces nouvelles connaissances permettront le développement d'une nouvelle régie d'ÉA de la tomate de serre cultivée sous les conditions climatiques du Québec.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

**Alba**, R., Cordonnier-Pratt, M-M., Pratt, L.H. (2000). Fruit-localized phytochromes regulate lycopene accumulation independently of ethylene production in tomato. *Plant Physiology*. **123** :363–370.

**Azuma**, A., Ito, A., Moriguchi, T., Yakushiji, H., Kobayashi, S. (2012). Light emitting diode irradiation at night accelerates anthocyanin accumulation in grape skin. *Acta Horticulturae*. **956** :341–347.

**Bian**, ZH., Yang, QC., and Liu, WK. (2015). Effects of light quality on the accumulation of phytochemicals in vegetables produced in controlled environments: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. **95** :869-877.

**Brandt**, K., Giannini, A., Lercari, B. (1995). Photomorphogenic responses to UV radiation III: A comparative study of UVB effects on anthocyanin and flavonoid accumulation in wild-type and aurea mutant of tomato (*Lycopersicon esculentum* MILL.). *Photochemistry and photobiology*. **62** (6) :1081-1087.

**Brown**, C.S., Schuerger, A.C., Sager, J.C. (1995). Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. **120** :808–813.

**Bugbee**, B. (2016). Toward an optimal spectral quality for plant growth and development: the importance of radiation capture. *Acta Horticulturae*. **1134** : 1-12.

**Combris**, P., Amiot-Carlin, MJ., Caillaivet, F., Causse, M., Dallongeville, J., Padilla, M., Renard, C., Soler, LG. (2007). Les fruits et légumes dans l'alimentation : enjeux et déterminants de la consommation (Rapport d'expertise). *IDEAS Working Paper Series from RePEc*. Chp 2: 1-63.

**Demote-Mainard**, S., Péron, T., Corot, A., Bertheloot, J., Le Gourrierec, J., Pelleschi-Travier, S., Crespel, L., Morel, P., Huché-Thélier, L., Boumaza, R., Vian, A., Guérin, V., Leduc, N., Sakr, S. (2016). Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*. **121** :4-21.

**Devlin**, P.F., Christie, J.M., Terry, M. J. (2007). Many hands make light work. *Journal of Experimental Botany*. **58** (12) :3071-3077.

**Dorais**, M., Papadopoulos, A.P., Gosselin, A. (2001). Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews*. **26** : 239-319.

**Dorais, M., Ménard, C., Gosselin, A., Léonhart, S., Gaudreau, L., Desrochers, L., Martel, M., Vézina, L.P., Purcell, M., Carpentier, E. (2006).** Influence of supplemental lighting on the production of medicinal plants, spinach and alfalfa for the nutraceutical and pharmaceutical sectors. *Acta Horticulturae*. **711** :43–50.

**Dorais, M. et Ehret, DL. (2008).** Agronomy and the nutritional quality of fruit. *Dans Improving the Health-Promoting Properties of Fruit and Vegetable. Publié par Tomás-Barberán, F.A., Gil, M.I.* Woodhead publishing limited, Cambridge (London). **14** :346-391

**Dorais, M., Ehret, DL., Papadopoulos, AP. (2008).** Tomato quality and healthy-components, in: Bioactive phytochemicals: connecting farm and health. *Phytochemistry Review*. **7** :231-250.

**Dorais M., Mitchell A.C., Kubota C. (2016).** Chapter 17 Lighting greenhouse vegetables. In: *Lighting up profits: understanding greenhouse lighting.* Eds R. Lopez and E. Runkle. (invited book chapter, in press).

**Folta, K.M., Childers, K.S. (2008).** Light as a growth regulator: Controlling plant biology with narrow-bandwidth solid-state lighting systems. *HortScience*. **43** :1957–196.

**Galvão, V.C., et Fankhauser, C. (2015).** Sensing the light environment in plants: photoreceptors and early signaling steps. *Current Opinion in Neurobiology*. **34** :46–53.

**Gautier, H., Rocci, A., Buret, M., Grasselly, D., Dumas, Y. and Causse, M. (2005).** Effect of photoselective filters on the physical and chemical traits of vine-ripened tomato fruits. *Canadian Journal of Plant Science*. **85** :439-446.

**Gautier, H., Diakou-Verdin, V., Bénard, C., Reich, M., Buret, M., Bourgaud, F., Poëssel, J-L., Caris-Veyrat, C., Génard, M. (2008).** How does tomato quality (sugar, acid, and nutritional quality) vary with ripening stage, temperature, and irradiance? *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. **56** (4) :1241–1250.

**Gautier, H., Massot, C., Stevens, R., Sérino, S. and Génard, M. (2009).** Regulation of tomato fruit ascorbate content is more highly dependent on fruit irradiance than leaf irradiance. *Annals of Botany*. **103** :495- 504.

**Génard, M., Robin C., Gautier H., Massot C., Bénard C., Lariat R., Bertin N., Le Bot J., Adamowicz S., Bourgaud F. (2010).** Élaboration de la qualité du fruit : composition en métabolites primaires et secondaires. *Innovations Agronomiques*. **9**: 47-57.

**Giliberto, L., Perrota, G., Pallara, P., Wellwr, J.L., Frazer, P.D., Bramley, P.M., Fiore, A., Tavazza, M., Giuliano, G. (2005).** Manipulation of the blue light photoreceptor cryptochrome 2 in tomato affects vegetative development, flowering time, and fruit antioxidant content. *Plant Physiology*. **137** :199-208.

**Gómez, C., Mitchell C. A. (2014).** Supplemental lighting for greenhouse-grown tomatoes: Intracanopy LED towers vs. overhead HPS lamps. *Acta Horticulturae*. **1037**: 855-862.

- Gómez, C., Mitchell C. A.** (2015). Opportunities and challenges of light-emitting diodes for greenhouse supplemental lighting. *LED Symposium*. Tucson, AZ.
- Guo, J., Wang, M-H.** (2010). Ultraviolet A-specific induction of anthocyanin biosynthesis and PAL expression in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plant growth régulation*. **62** :1-8.
- Hao, X. Little, C. Zheng, J.M. and Cao, R.** (2016). Far-red LEDs improve fruit production in greenhouse tomato grown under high-pressure sodium lighting. *Acta Horticulturae*. **1134**: 95-102.
- Helyes, L. and Lugasi, A.** (2006). Formation of certain compounds having technological and nutritional importance in tomato fruits during maturation. *Acta Alimentaria*. **35** (2) :183-193.
- Hernández, R. and Kubota, C.** (2015). Greenhouse supplemental light quality for vegetable nurseries. *LED symposium*. University of Arizona.
- Heuvelink, E., Bakker, M.J., Hogendonk, L., Janse, J., Kaarsemaker, R., Maaswinkel, R.** (2006). Horticultural lighting in the Netherlands: New developments. *Acta Horticulturae*. **711** :25–33.
- Hideg, E. , Jansen, M. A.K, and Strid, A.** (2013). UV-B exposure, ROS, and stress: inseparable companions or loosely linked associates? *Trends in Plant Science*. **18** (2) :107-115.
- Hogewoning, S.W., Trouwboris, E., Meinen, E. and Van Ieperen, W.** (2012). Finding the optimal growth-light spectrum for greenhouse crops. *Acta Horticulturae*. **956** :357-363.
- Huché-Théliier, L., Crespel, L., Le Gourrierec, J., Morel, P., Sakr, S., Leduc, N.** (2016). Light signaling and plant responses to blue and UV radiations—Perspectives for applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*. **121**: 22–38.
- Isaac, R. et Johnson W.** (1976). Determination of total nitrogen in plant tissue, using a block digester. *Journal of the AOAC*. **59** (1): 98-100.
- Kumar, K.G.S., Hao, X. Khosla, S., Guo, X. and Bennett N.** (2016). Comparison of HPS lighting and hybrid lighting with top HPS and intra-canopy LED lighting for high-wire mini-cucumber production. *Acta Horticulturae*. **1134**: 111-118.
- Labrie, C. and Verkerke, W.** (2014). Healthy harvest from the greenhouse. *Acta Horticulturae*. **1017** : 423-426.
- Lacroix, M.** (2005). Nutrition en calcium problèmes et prévention. *Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ)*. 1-11.
- Lambert, L., Turcotte, G., Painchaud, J., et Lapalme, J.** (2003). Méthodologie pour la prise de données Tom'Pousse. *Réseau d'avertissement phytosanitaires - Tom'Pousse - Cultures en serre*. **1** : 1-6.

**Lee, S.Y., Kwon, J.K., Park, K.S., Choi, H.G.** (2014). The effect of LED light source on the growth and yield of greenhouse grown tomato. *Acta Horticulturae*. **1037**: 789-793.

**Lester, G.** (2006). Environmental regulation of human health nutrients (ascorbic acid,  $\beta$ -carotene, and folic acid) in fruits and vegetables. *HortScience*. **41**:59–64.

**Li, Q., Kubota, C.** (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany*. **67**:59–64.

**Lu, N., Maruo, T., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ito, Y., Ichimura, T., Shinohara, Y.** (2012). Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density. *Environmental Control in Biology*. **50** (1): 63-74.

**Massa, G.D., Kim, H-H., Wheeler, R.M., Mitchell, C.A.,** (2008). Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*. **43** :1951–1956.

**Ménard, C., Dorais, M., Hovi, T., Gosselin, A.** (2006). Developmental and physiological responses of tomato and cucumber to additional blue light. *Acta Horticulturae*. **711** :291–296.

**Morrow, R.C.** (2008). LED lighting in horticulture. *HortScience*. **43**: 1947–1950.

**Nelson, J.A. et Bugbee, B.** (2014). Economic analysis of greenhouse lighting: Light emitting diodes vs. High intensity discharge fixtures. *PLoS ONE*. **9** (6): e99010 doi: 10.1371/journal.pone.0099010.

**Olle, M. and Virsilé, A.** (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and food science*. **22**: 223–234.

**OMAFRA.** (2010). Growing greenhouse vegetables in Ontario. *Ministry of agriculture, food and rural affairs*. Publication 836.

**Pepin, S., Dorais, M., Fortier, E., Béchard-Dubé, S.A., Ménard, C, Bacon, R.** (2014). Beneficial effects of using a 3-D LED interlighting system for organic greenhouse tomato grown in Canada under low natural light conditions. *Acta Horticulturae*. **1041** :239-246.

**Prudent, M.** (2009). Analyse des variations de poids et de teneurs en sucres du fruit de tomate par une approche intégrative combinant des études écophysiological, génétique et moléculaire. *Vegetal Biology*. Université d'Avignon. 1-223.

**Shinkle, J.R., Atkins, A.K., Humphrey, E.E., Rodgers, C.W., Wheeler, S.L., and Barnes, P.W.** (2004). Growth and morphological responses to different UV wavebands in cucumber (*Cucumis sativum*) and other dicotyledonous seedlings. *Physiologia Plantarum*. **120** (2): 240–248 <http://dx.doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.0237.x>. PubMed

**Schofield, A., Paliyath, G. (2005).** Modulation of carotenoid biosynthesis during tomato fruit ripening through phytochrome regulation of phytoene synthase activity. *Plant Physiology & Biochemistry*. 43:1052–1060.

**Turcotte, G., Larouche, R., Carrier, A., Lambert, L. (2015).** Production de la tomate de serre au Québec. *Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ)*.

**Wang, Z. (2015).** Aperçu statistique de l'industrie des légumes de serre du Canada. *Agriculture et Agroalimentaire Canada*.

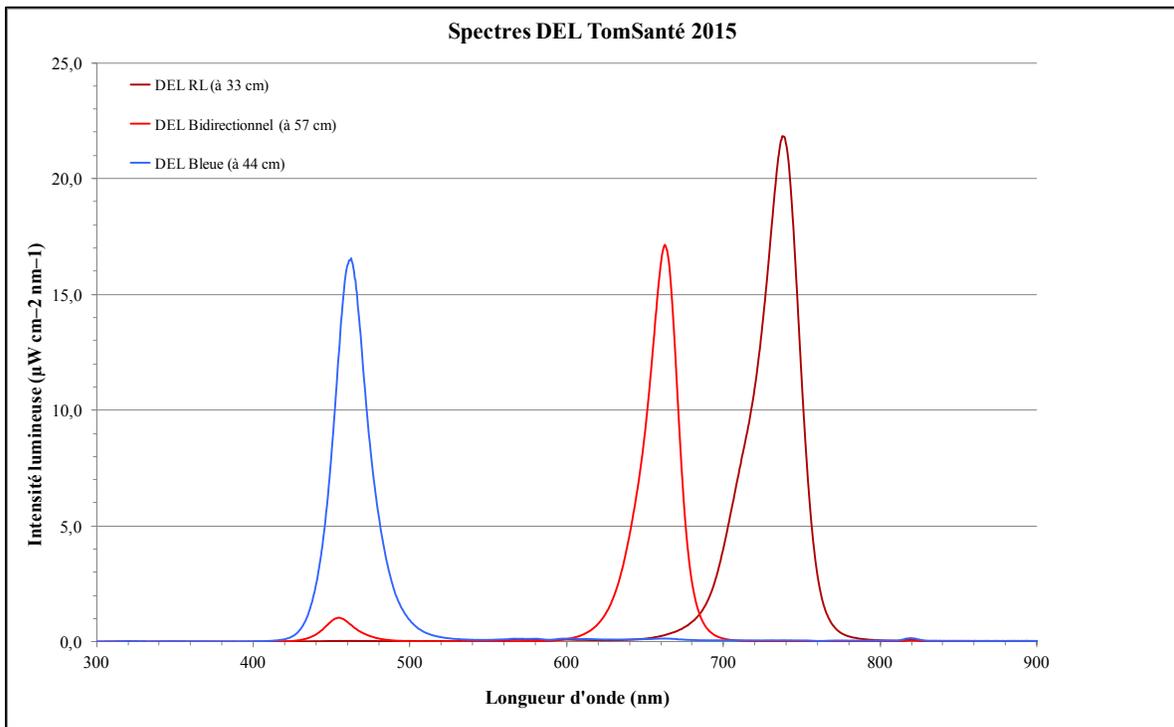
**Wargent, J.J., Moore, J.P., Roland Ennos, A., and Paul, N.D. (2009).** Ultraviolet radiation as a limiting factor in leaf expansion and development. *Photochemistry and Photobiology*. 85 (1): 279–286 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1751-1097.2008.00433.x>. PubMed.

**Wargent, J.J. (2016).** UV LEDs in horticulture: from biology to application. *Acta Horticulturae*. 1134 : 25-32.

## Annexe 1 Description des traitements et caractérisation des lampes

Au jour 1 le 1 mai 2015, tous les traitements lumineux DEL avaient environ le même cumul journalier. Selon la programmation, le traitement B/R était en fonction de 6 h 00 à 24 h 00 tandis que les traitements B/R+B+RL et B/R+RL+B+RL étaient en fonction de 6 h 00 à 18 h 00. Le rouge lointain appliqué durant la noirceur (nuit) était en fonction de 2 h 00 à 4 h 00. Le traitement UV était appliqué à 23 h 00, 24 h 00, 1 h 00, 2 h 00 et 3 h 00 pour une durée de 10 minutes à chaque fois. Cela donnait un total de 50 minutes d'illumination sous les fluorescents UV. Le 15 mai 2015, nous avons réparti ce traitement UV de façon différente pour réduire les effets de chaleur, soit 2 minutes d'illumination à tous les 10 minutes (i.e. 10 min. par heure) aux heures mentionnées précédemment. Puis, pour l'essai qui a eu lieu à l'automne 2015, le programme a été modifié et les fluorescents UV étaient mis en fonction une minute à tous les 20 minutes pour 4 heures pour un total de 12 minutes. Pour décrire l'intensité lumineuse des fluorescents utilisés (Tableau A.1), la moyenne de ceux-ci était de 7,9 kJ par m<sup>2</sup> par heure. Lors de l'essai été 2015, avec 50 minutes de mise en fonction par jour, on obtenait environ 6,6 kJ par mètre carré par jour et lors de l'essai automne-hiver 2015, avec 12 minutes de mise en fonction par jour, on obtenait environ 1,6 kJ par mètre carré par jour, soit ~1/4 de la dose de l'essai été 2015. Pour les DEL, le total de  $\mu\text{mol/s}$  par lampe était de 50 pour le RL, 13 pour le B et 220 pour le R, avec un nombre de DEL/lampe de 120 RL, 90 B et 200 R.

Pour la caractérisation des DEL, une boîte de carton dont la hauteur d'ouverture était de 16 cm x 27,5 cm de largeur pour une aire de 0,44 m<sup>2</sup> a été utilisée lors de la prise de mesure pour éliminer toute perte de photons ou de pollution lumineuse autour, et la distance de mesure était de 33 cm pour le RL, 57 cm pour le R et 44 cm pour le B. Cette variation de la distance de mesure était principalement en fonction de la puissance des DEL mesurées, car le temps d'intégration ne suffisait pas à contrôler la quantité de lumière qui entrait dans le spectromètre. Cette distance de mesure variait également à cause du design de la lampe et du positionnement que l'on réussissait à obtenir pour avoir une opacité autour des diodes (i.e. pas de lumière parasite) (Figure A.1) ; les mesures UV ont quant à elles été prises à 20 cm des fluorescents (Tableau A.1).



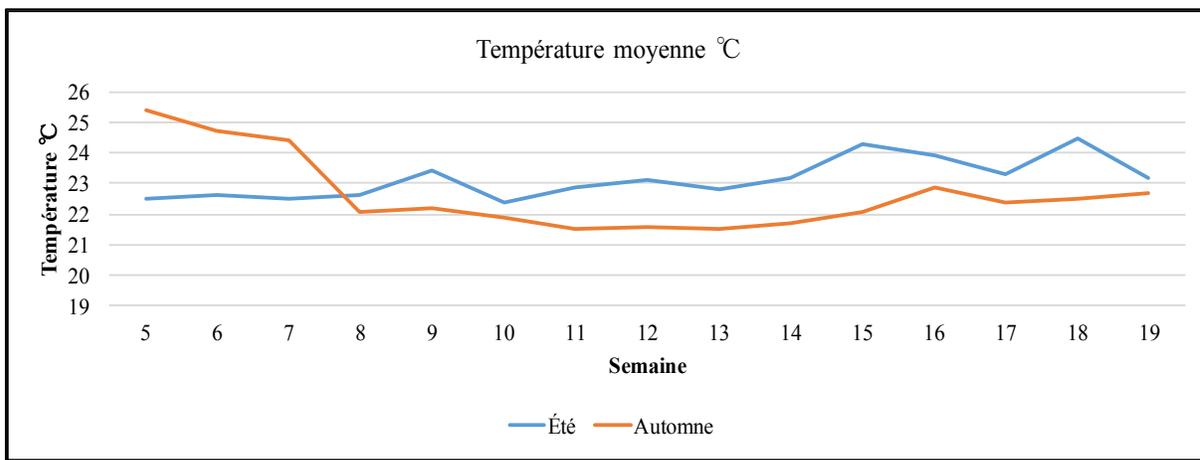
**Figure A.1** : Courbes représentant les différentes ondes DEL selon la couleur et la distance de mesure.

**Tableau A.1** : Caractérisation des fluorescents UV pour le projet 2015

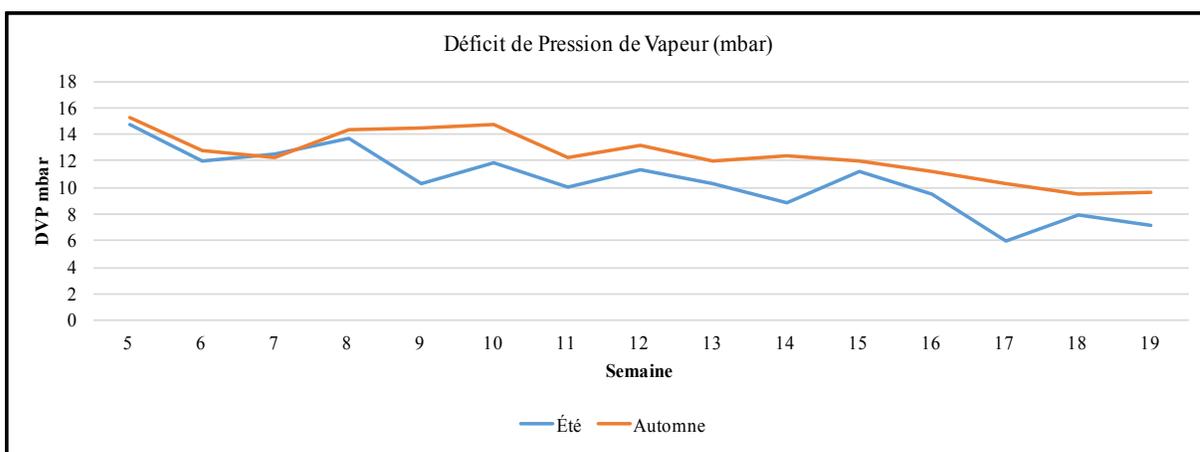
<i>Fluorescent no.</i>	<b>UV-A (kJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)</b>	<b>UV-B (kJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)</b>	<b>UV-C (kJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)</b>	<b>TOTAL (kJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)</b>
UV1	6,00	7,59	0,16	13,75
UV2	5,12	7,15	0,21	12,48
UV5	3,23	3,14	0,07	6,44
UV6	4,03	4,37	0,09	8,50
UV8	2,87	2,80	0,08	5,75
UV9	3,77	4,08	0,07	7,91
UV10	5,19	6,71	0,14	12,04
UV11	4,97	6,27	0,16	11,39
UV12	3,86	4,33	0,13	8,32
UV13	3,35	3,73	0,12	7,20
UV14	2,96	3,22	0,13	6,31
UV15	3,33	3,60	0,06	6,99
UV16	2,85	3,12	0,05	6,02
UV17	1,93	1,65	0,03	3,61
UV20	4,12	4,83	0,09	9,04
UV21	3,44	3,60	0,07	7,11
UV22	5,65	7,10	0,13	12,88
UV24	3,79	4,30	0,08	8,17
UV25	2,68	2,92	0,05	5,65
UV26	2,22	2,10	0,03	4,36
UV27	2,94	3,12	0,05	6,10
UV28	2,53	2,34	0,03	4,90
UV29	3,54	3,67	0,05	7,26
UV30	3,71	4,05	0,06	7,82
UV31	2,99	2,81	0,03	5,83
UV32	3,65	3,93	0,05	7,63
UV33	4,09	6,12	0,14	10,36
<b>Moyenne</b>	<b>3,66</b>	<b>4,17</b>	<b>0,09</b>	<b>7,92</b>
<b>Écart-type</b>	<b>1,01</b>	<b>1,63</b>	<b>0,05</b>	<b>2,67</b>

Mesures effectuées à 20 cm des fluorescents

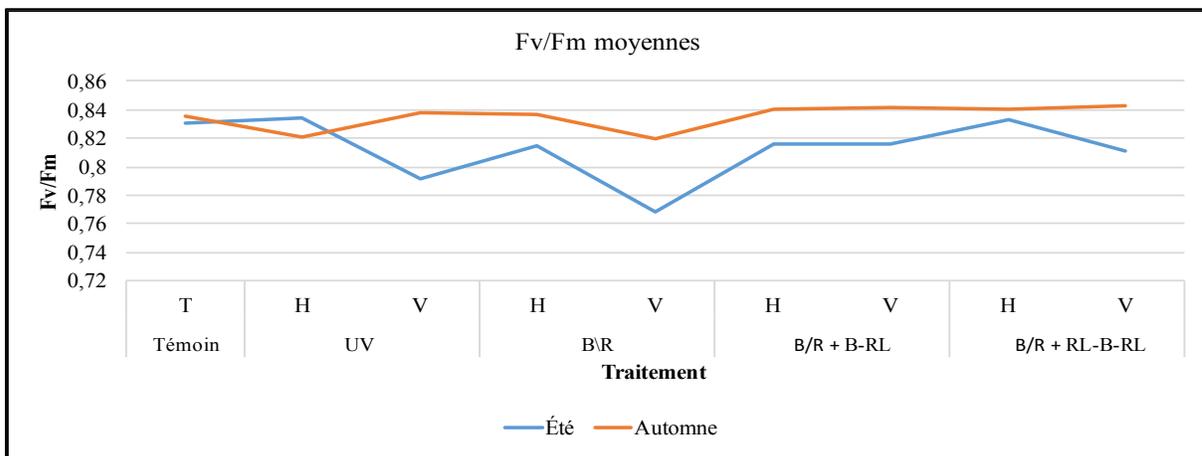
## Annexe 2 Mesures des conditions de culture et de récolte



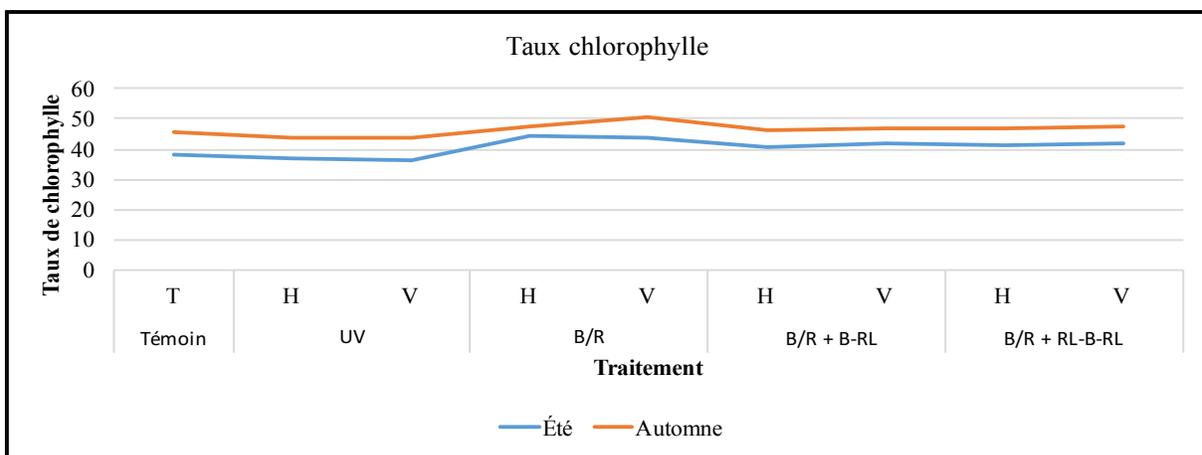
**Figure A.1:** Courbes des températures hebdomadaires moyennes dans la serre expérimentale pour les deux saisons (été et automne).



**Figure A.2:** Courbes des DVP hebdomadaires moyens dans la serre expérimentale pour les deux saisons (été et automne).



**Figure A.3 :** Courbes de fluorescence chlorophyllienne pour les traitements par moyenne de Fv/Fm pour les deux saisons (été et automne).



**Figure A.4 :** Courbes des moyennes des taux de chlorophylle (valeurs de SPAD) pour les traitements de chacune des saisons (été 1 et automne 2).

**Tableau A.1 :** Moyennes des valeurs L\*a\*b\* lors de la récolte selon les traitements et par saison de culture.

Variable mesurée	Traitement								
	Témoin	UV		B/R		B/R+B+RL		B/R+RL+B+RL	
	T	H	V	H	V	H	V	H	V
<b>Été</b>									
<b>L*</b>	41,14	41,74	40,97	41,38	41,32	40,77	40,77	40,53	40,98
<b>a*</b>	24,86	25,74	24,60	24,49	25,13	24,16	23,91	22,87	24,33
<b>b*</b>	24,85	25,25	24,00	24,37	24,63	23,42	23,15	22,83	23,37
<b>Automne</b>									
<b>L*</b>	41,98	41,94	41,52	41,77	41,89	41,33	41,78	41,53	41,45
<b>a*</b>	24,98	24,90	24,59	25,02	25,39	24,18	24,62	24,42	25,15
<b>b*</b>	24,52	24,33	23,76	24,14	24,50	22,97	23,44	23,23	23,48