



HAL
open science

Caractérisation des interactions plante lumière au sein de couverts complexes à base de colza (*Brassica napus* L.)

Jeanne Simon

► To cite this version:

Jeanne Simon. Caractérisation des interactions plante lumière au sein de couverts complexes à base de colza (*Brassica napus* L.). [Stage] 2016, 40 p. hal-02792693

HAL Id: hal-02792693

<https://hal.inrae.fr/hal-02792693v1>

Submitted on 5 Jun 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Caractérisation des interactions plante lumière au sein de couverts complexes à base de colza (*Brassica napus* L.)

Rapport de stage de Master 1 AETPF

Jeanne Simon

Responsable du stage : Alexandra Jullien, Maître de conférences

Laboratoire d'accueil : UMR INRA AgroParisTech ECOSYS, Grignon

11/04/2016 au 15/07/2016



ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussignée Jeanne Simon, déclare être pleinement consciente que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support (ouvrages, publications, rapports d'étudiant, internet etc...) constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport.

REMERCIEMENTS

Je tenais à remercier le directeur d'unité, Enrique Barriuso, le responsable de l'équipe Eco&Phy, Benjamin Loubet, ainsi que toute l'équipe Eco&Phy pour m'avoir accueilli dans le laboratoire pendant ces trois mois de stage.

Je tenais particulièrement à remercier ma responsable de stage Alexandra Jullien pour m'avoir permis de faire ce stage très enrichissant à la suite de mon projet bibliographique, mais aussi pour son accompagnement, toutes ses relectures et ses très bons conseils. Merci également à Alain Fortineau pour toutes ses explications et conseils au sujet des mesures de l'environnement lumineux et à Amélie Mathieu pour m'avoir permis de participer à toutes ces manip.

Un grand merci à l'équipe technique, Julie Rodrigues, Christelle Franchet, Maxime Marques, Fabrice Duhamel, Josiane Jean-Jacques et Florence Lafouge, une équipe très sympathique sans qui je n'aurais pas pu acquérir mes données.

Merci à l'équipe pédagogique du Master, Jean-François Castell et Erwan Personne, pour avoir été très présents cette année.

Pour terminer je tenais à remercier les rapporteurs de ce rapport de stage qui prendrons le temps de lire le travail que j'ai effectué pendant ces trois mois.

RESUME

L'objectif de cette étude est de savoir si les diodes électroluminescentes (LED) permettent de modifier indépendamment la qualité et la quantité de lumière au sein d'un couvert de colza pour identifier le rôle respectif de ces deux variables sur la ramification, qui est une composante du rendement. La qualité de la lumière correspond à sa composition spectrale et ici nous nous sommes intéressés au rapport rouge clair/rouge sombre (Rc:Rs) connu pour son effet sur la ramification. La quantité de lumière correspond quant à elle aux radiations photosynthétiquement actives (PAR) et détermine le facteur trophique. Le Rc:Rs et le PAR diminuent progressivement lorsque l'on se dirige vers le bas d'un couvert, et cette diminution est d'autant plus forte que la densité augmente. Elle a pour conséquence de bloquer les ramifications basales des plantes sans que l'on sache si c'est le facteur trophique ou spectral qui est le plus limitant. Pour dé-corréler les deux effets, nous avons appliqué des traitements combinant deux densités de plantes et l'ajout de LED rouges sombres (Rs) ou blanches. Ainsi, nous avons pu montrer que des LED Rs permettent de modifier la qualité de la lumière de manière indépendante malgré un léger effet ombrage du support. L'enrichissement en Rs du couvert à faible densité (15 plantes/m²) a eu comme conséquence de bloquer l'élongation des bourgeons basaux visés mais également d'augmenter la hauteur de la plante et le nombre d'entrenœuds produits. Finalement, le nombre de ramifications n'a pas été modifié. L'augmentation de la densité (30 plantes/m²), quant à elle, a provoqué un décalage du profil de ramification vers le haut *via* une élongation des entrenœuds imputable à la diminution du Rc:Rs et du PAR. L'ajout des LED blanches dans ce couvert dense n'a pas modifié le PAR mais une baisse de l'élongation des entrenœuds a été observée, traduisant une diminution de la compétition pour la lumière. Le profil de ramification en fonction de la hauteur n'a quant à lui pas été modifié.

ABSTRACT

The aim of this study is to know if light-emitting diodes (LED) can modify independently light quality and quantity in a cover made of oilseed rape to identify the role of these two variables on branching, a yield component. Light quality corresponds to its spectral composition and here we focused on the red over far-red ratio (R:FR) well recognized for its effect on shoot branching. Light quantity corresponds to the photosynthetically active radiations (PAR) and determines the trophic factor. R:FR and PAR decrease as we go towards the bottom of the cover, and this decrease increases with density. This phenomenon has for consequence to block plants basal branching but we do not know whether it is the trophic or the spectral factor the most limiting one. To decorrelate the two effects, we applied treatments combining two plants densities and the addition of far-red (FR) or white LED. We showed that FR LED can modify light quality and quantity independently although the small shading effect of the bracket. The FR addition in the low density cover (15 plants/m²) blocked the elongation of the basal buds targeted but also it increases the plant height and the number of internodes produced. Finally, the number of branching was not changed. The increased density (30 plants/m²) provoked an upward shift in the branching profile through the internodes elongation attributable to the R:FR and PAR decrease. The addition of white LED in this dense cover did not change the PAR but a decrease in internodes elongation was observed, reflecting a decrease in light competition. The branching profile was not changed.

Sommaire

Introduction.....	1
Etude bibliographique	2
I) <i>Brassica napus</i> L.	2
a. Stades de développement.....	2
b. La ramification.....	3
II) Environnement lumineux.....	3
a. Gradient d'intensité lumineuse à travers le couvert.....	3
b. Modification du rapport rouge clair/rouge sombre à travers le couvert	4
c. Dé-corréler qualité et quantité de lumière	4
III) Effets de l'environnement lumineux sur l'architecture des plantes.....	5
Problématique.....	6
Matériel et méthodes.....	8
I) Dispositif expérimental	8
a. Le dispositif de culture des plantes en bacs.....	8
b. Les différents traitements	8
c. Les diodes électroluminescentes (LED).....	11
II) Acquisition et analyse des données	13
a. Mesures non destructives	13
b. Mesures destructives	13
c. Mesure de la composition spectrale de la lumière	13
d. Mesure de la température	15
e. Analyse des données	15
f. Abréviations.....	15
Résultats.....	16
I) Caractérisation de l'effet des traitements	16
a. Modification de l'environnement	16
b. Effet sur la phénologie et l'architecture des plantes	17
II) Analyse topologique de l'architecture des plantes.....	21
III) Analyse des liens longueur de ramification/Rc:Rs	24
a. Cas des LED Rs	24
b. Extrapolation pour les autres traitements	25
Discussion.....	27
I) Modification de la qualité et de la quantité de lumière	27

II) Modification de la phénologie et de la topologie	28
Conclusion	30
Références bibliographiques.....	31
Annexes	32

INTRODUCTION

Avec 1,6 Mha en 2012, le colza d'hiver (*Brassica napus* L.) est la principale culture oléagineuse en France. La production française représente 28% de la production Européenne¹. Elle a connu un fort développement de ses surfaces ces dix dernières années du fait du développement des biocarburants. Les autres débouchés sont l'huile alimentaire, la bioraffinerie et l'alimentation animale². Cette culture d'importance économique majeure présente cependant un indice de fréquence de traitement très élevé (5,5 contre 3,8 pour le blé tendre³) notamment d'une forte dépendance aux insecticides. Afin de réduire l'utilisation d'intrants chimiques et dans l'optique d'utiliser cette espèce dans des mélanges de cultures, il s'agit d'identifier des variétés résilientes face à différentes contraintes environnementales. Un caractère déterminant pour la résilience du colza est sa capacité à ramifier. En effet, la ramification du colza est une composante principale du rendement, elle va déterminer le nombre d'inflorescences et donc de siliques. De plus, ce caractère architectural est très plastique, le nombre de ramifications varie en conséquence fortement en fonction des conditions environnementales, qui peuvent être par exemple la présence de ravageurs (mélégèthes), l'intensité lumineuse disponible résultant de la compétition inter-plante ou encore la composition spectrale de la lumière.

Parmi ces contraintes environnementales, la lumière a un statut particulier car elle ne peut pas être ajustée ou augmentée par les techniques culturales comme c'est le cas des autres facteurs limitants (azote, eau, maladie). On peut uniquement la modifier en réduisant ou en augmentant la densité de semis, ou bien en modifiant l'architecture des variétés. A travers les couverts, l'environnement lumineux des plantes est modifié. Cette modification est connue pour avoir des effets sur le nombre de ramification par plante, mais il est difficile de décorrélérer l'effet des deux variables environnementales qui le compose : la qualité et la quantité de lumière, autrement dit, la composition spectrale et l'intensité de la lumière. Il s'agit alors de pouvoir comprendre les effets respectifs ces deux variables, de pouvoir déterminer laquelle est la plus limitante pour la ramification et ainsi pouvoir sélectionner des variétés adaptées à des environnements lumineux modifiés.

Dans cette optique de dé-corrélation de ces variables, une expérience en bac ayant pour but de simuler une condition de peuplement a été mise en place au laboratoire ECOSYS (UMR INRA AgroParisTech, Grignon) sur du colza de printemps au moyen de LED rouge sombre et blanches modifiant respectivement, spécifiquement et de manière localisée la qualité et la quantité de lumière au sein du couvert. Dans ce rapport uniquement les résultats des mesures non destructives de cette expérimentation seront analysés afin de répondre à la question suivante : est-ce qu'on a une modification de la morphogénèse et de la ramification en particulier en réponse à l'éclairage par les LED ?

¹ Terresoleopro.com

² Terresinovia.fr

³ Agreste.agriculture.gouv.fr

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I) Brassica napus L.

a. Stades de développement

Le colza est une plante annuelle faisant partie de la famille des Brassicacées. Les différents stades de développement sont représentés pour le colza d'hiver dans la Figure 1. Dans ce rapport nous étudions le colza de printemps, ses stades de développement sont similaires au colza d'hiver, son stade rosette est plus court (pas de phase hivernale) et il est plus sensible au froid.

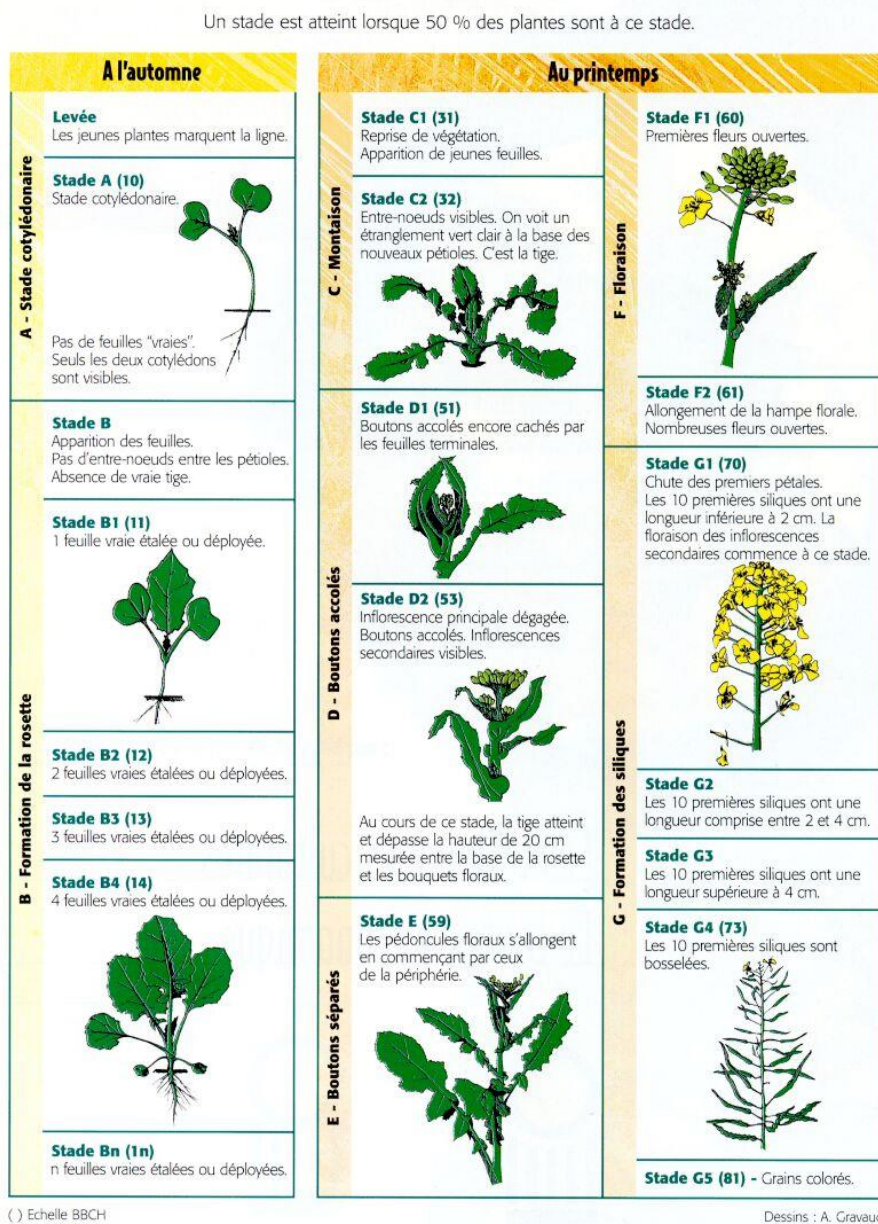


Figure 1 : Les stades de développement du colza d'hiver 1 (Colza d'hiver - Éditions CETIOM - mai 2002).

b. La ramification

La plante est constituée de phytomères (Figure 2) comprenant chacun un entrenœud, une feuille et un bourgeon axillaire à l'aisselle de la feuille. L'élongation de ce bourgeon produit une ramification. Le nombre total d'entrenœud ou de feuilles fixe donc le nombre potentiel de ramification et la fin de la production des phytomères a lieu au moment de la floraison. La ramification du colza va donc dépendre des conditions de croissance de la plante ainsi que de sa phénologie (Jullien *et al.*, 2011).

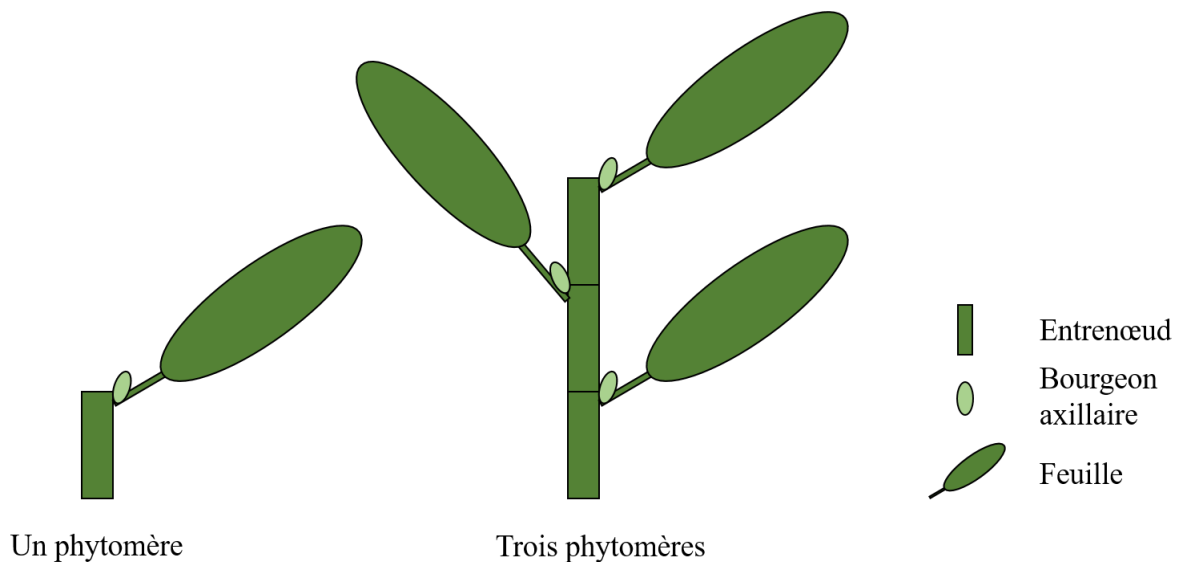


Figure 2 : Représentation schématique de phytomères, ensemble constitués d'un entrenœud, d'une feuille et d'un bourgeon axillaire.

II) Environnement lumineux

a. Gradient d'intensité lumineuse à travers le couvert

Plus on se dirige vers le bas du couvert plus les radiations utiles à la photosynthèse (PAR), comprises entre 400 et 700 nm (Figure 3), sont absorbées par les surfaces vertes des plantes. La quantité de lumière disponible pour les plantes est donc décroissante du haut vers le bas du couvert. De plus, plus la densité de semis augmente plus ce gradient va être fort, la compétition inter-plante pour la lumière augmente donc avec la densité.

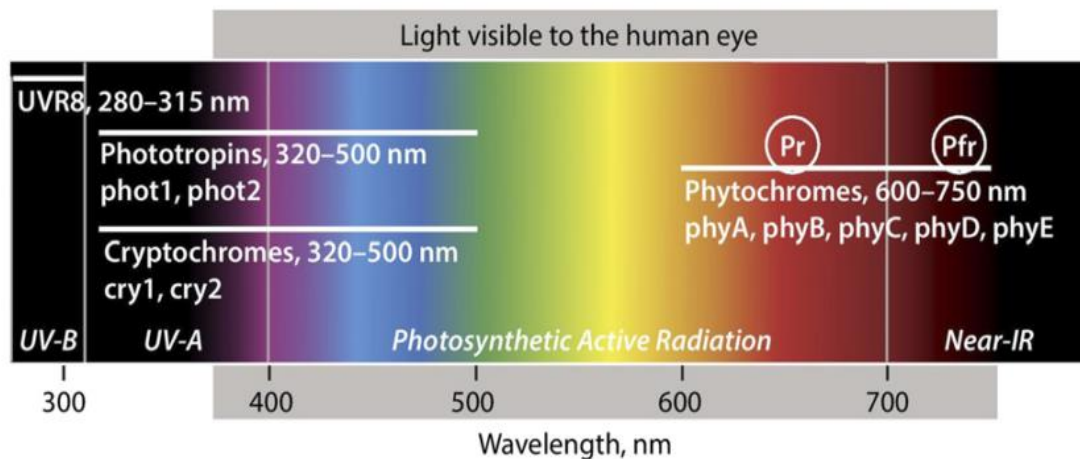


Figure 3 : Le rayonnement photosynthétiquement actif est compris entre 400 et 700 nm. Le rouge clair faisant partie du PAR, une modification de la qualité de la lumière en changeant le rapport rouge clair/rouge sombre va avoir une influence sur la qualité de la lumière. De même avec la lumière bleue. D'après Ouzounis et Alle, 2015.

b. Modification du rapport rouge clair/rouge sombre à travers le couvert

La qualité de la lumière est la composition spectrale de la lumière. Cette variable environnementale va jouer sur la photomorphogénèse, autrement dit, la sensibilité de la morphogénèse aux photons. Le rapport rouge clair/rouge sombre (Rc:Rs) est un des facteurs de la morphogénèse les plus étudiés. Contrairement au rouge clair, le rouge sombre ne fait pas partie du PAR donc lorsque l'on se dirige vers le bas du couvert il n'est pas absorbé par les surfaces photosynthétiques, il est réfléchi et diffusé au sein du couvert. Le Rc:Rs diminue donc du haut vers le bas du couvert (Casal, 2012). La densité de semis modifie également ce rapport étant donné qu'elle détermine la quantité de PAR absorbé (Figure 4), donc la quantité de rouge clair toujours disponible en bas du couvert. Des travaux préliminaires dans l'unité ont démontré que ce rapport était environ égal à 1 en haut d'un couvert de colza et descendait jusque 0,3 en bas du couvert en phase reproductrice (Teulière, 2015).

c. Dé-corréler qualité et quantité de lumière

L'intensité et la composition spectrale de la lumière suivent donc un gradient corrélé du bas vers le haut du couvert. A la suite de la réalisation d'une étude bibliographique préalable à ce stage (Simon, 2016) nous avons pu démontrer que la meilleure façon d'analyser les effets de la qualité et de la quantité de lumière indépendamment était d'utiliser des LED électroluminescentes (LED). En effet, les LED émettent sur une gamme très resserrée du spectre lumineux et permettent un enrichissement ciblé sur une longueur d'onde, par exemple en rouge sombre pour modifier le Rc:Rs sans modifier la quantité de PAR. En revanche, si ces dispositifs sont très utilisés en horticulture ou dans des essais en conditions contrôlées, ils n'ont pas encore été utilisés en conditions naturelles sur des plantes de grandes cultures en peuplement.

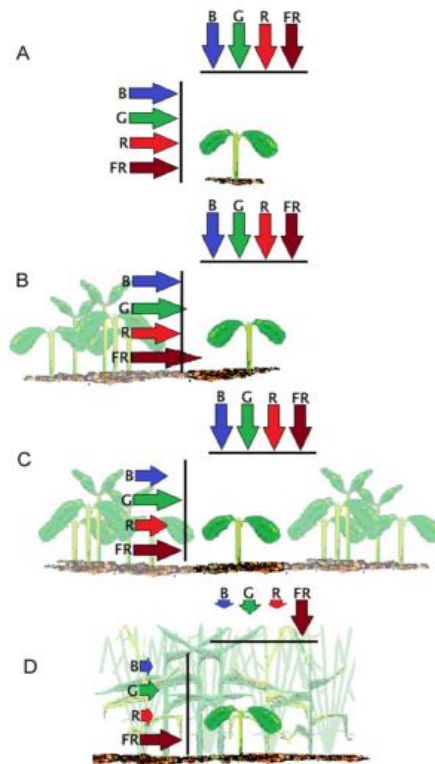


Figure 4 : Modification de la qualité de la lumière en fonction de la densité du couvert végétal. D'après Casal, 2012.

III) Effets de l'environnement lumineux sur l'architecture des plantes

Une augmentation de la densité provoque une diminution du PAR intercepté par les surfaces vertes et donc une diminution des assimilats disponibles pour faire des ramifications, la compétition inter-plante augmente. Cette augmentation de densité provoque également une baisse du Rc:Rs, donc une modification de la qualité de la lumière. Ce phénomène va donner lieu à un allongement des entrenœuds, donc à une augmentation de la taille des plantes et à une position plus érigée des feuilles, ce phénomène est appelé syndrome d'évitement de l'ombrage (« Shade Avoidance Syndrome », SAS) (Casal, 2012). Casal (2012) précise que si les plantes réagissent ainsi c'est grâce à des photorécepteurs qui sont des phytochromes pour le rouge clair et sombre et des cryptochromes pour le bleu.

Chez le blé, Moeller *et al.* (2014) ont démontré qu'un couvert constitué de plantes plus économes en nombre de talles (équivalent des ramifications chez le colza) grâce à un gène inhibiteur de tallage, aura une architecture modifiée et comme plus de rayonnement arrivera en bas du couvert lié à la diminution de la densité, l'efficacité d'interception du rayonnement sera améliorée. Il a également été montré que le rouge sombre ralentissait la production des talles (Casal, 1988).

Pour les plantes horticoles, Demotes-Mainard *et al.* (2015) nous indiquent qu'un faible Rc:Rs conduit à une élongation du pétiole et de la tige, due à une élongation des entrenœuds. Cette revue de littérature montre également qu'un faible Rc:Rs conduit à une inhibition du démarrage des bourgeons axillaires donc à une diminution de la ramification.

Pour le colza, une faible intensité lumineuse conduit à de plus faibles rendements Rondanini *et al.* (2014). En 2015, une expérience conduite à ECOSYS en plante isolée (Jullien *et al.*, 2015) a montré qu'un enrichissement en rouge sombre à la base d'une plante de colza isolée (aucun frein trophique) modifiait son architecture. En effet les premières ramifications se retrouvaient bloquées, la hauteur de la tige augmentée et l'architecture général de la plante ressemblait à celle une plante de peuplement alors que celle de la plante témoin était de type arbustif.

PROBLEMATIQUE

L'état de l'art précédent nous indique que la qualité de lumière (Rc:Rs) va modifier la ramification en interaction avec la quantité de la lumière et qu'il est difficile de dé-corréler les deux effets au sein d'un peuplement. La question étudiée dans cette étude est de savoir si l'utilisation de LED permet de modifier indépendamment qualité et quantité de lumière au sein d'un couvert et d'identifier le rôle respectif de ces deux variables sur la ramification.

Nous proposons de tester deux hypothèses :

- un éclairage rouge sombre dans un couvert de faible densité va réduire la ramification par rapport au témoin
- un apport supplémentaire d'énergie PAR dans un couvert dense va augmenter la ramification par rapport au témoin.

Pour tester ces hypothèses, un dispositif croisant les facteurs de densité de plantes (fort, faible) et différents éclairages (LED rouges sombres, blanches) a été réalisé. Les résultats attendus des différents traitements sont présentés dans la Figure 5.

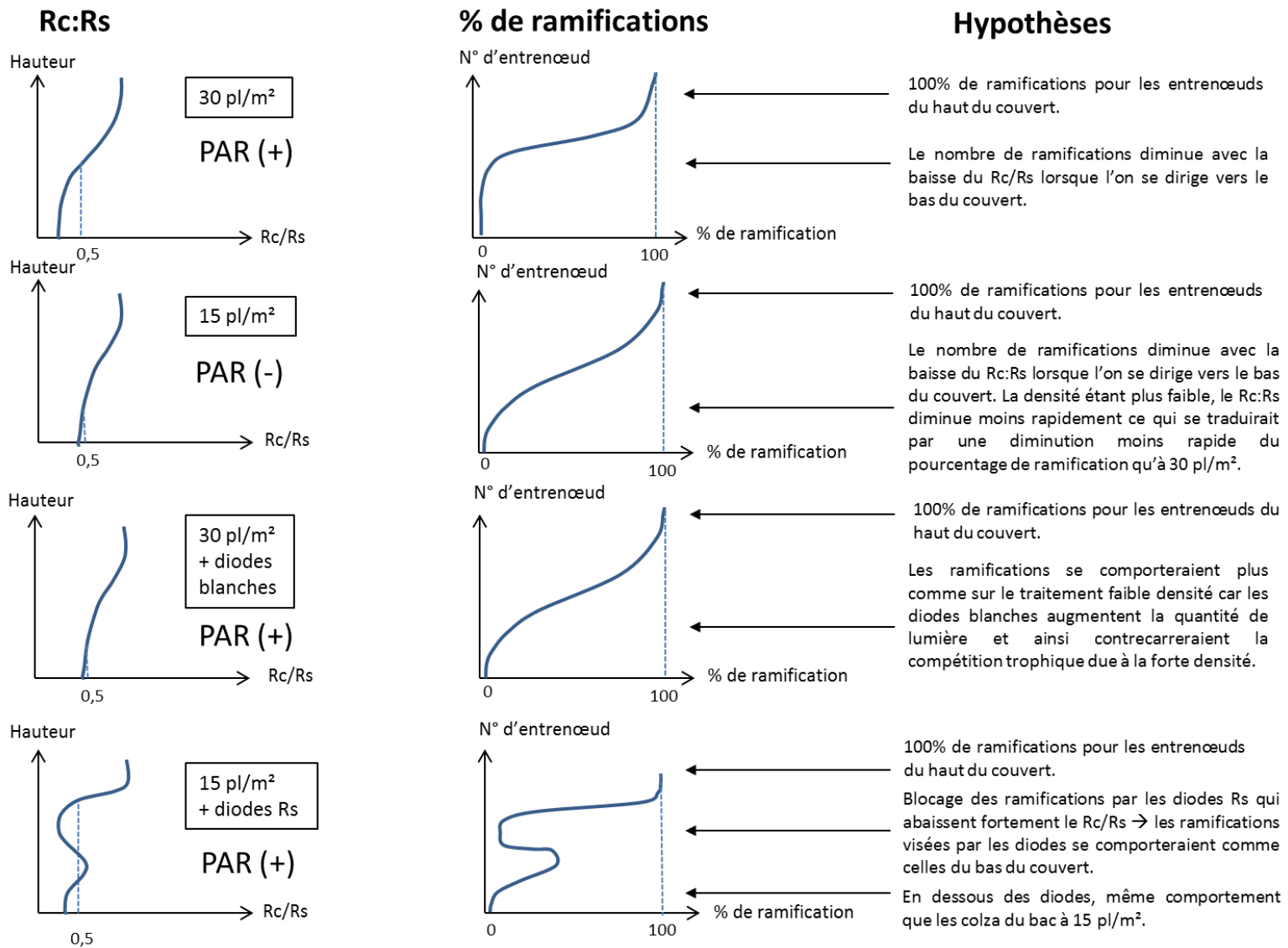


Figure 5 : Résultats hypothétiques de l'expérience au vu de ce que l'on sait grâce à la littérature.

MATERIEL ET METHODES

I) Dispositif expérimental

a. Le dispositif de culture des plantes en bacs

L'expérience a été réalisée au laboratoire ECOSYS à Thiverval-Grignon (Yvelines, France). Des colzas de la variété Aviso ont été semés le 11 février 2016 dans 20 bacs (Annexe 1) de dimensions 91x111x60cm remplis d'un mélange de terre (60%), de sable (20 %) et de terreau (20%). Chaque graine de colza a été préalablement pesée avant le semis pour sélectionner les graines moyennes. Afin d'obtenir 100% de levées, 4 graines ont été semées par emplacement, puis un démariage a été réalisé pour sélectionner les plants les plus homogènes (2 feuilles et surfaces foliaires équivalentes). Les colzas ont levé le 22 mars 2016. Dans certains bacs, un mélange colza-féverole a été réalisé. Ces féveroles, de la variété Mélodie, ont été semé le 5 avril et ont levé le 22 avril.

b. Les différents traitements

L'essai faisait partie d'un dispositif plus large sur les couverts hétérogènes composé de 16 bacs suivis et de 4 bacs de bordure (Figure 6) qui servent à limiter l'effet bordure.

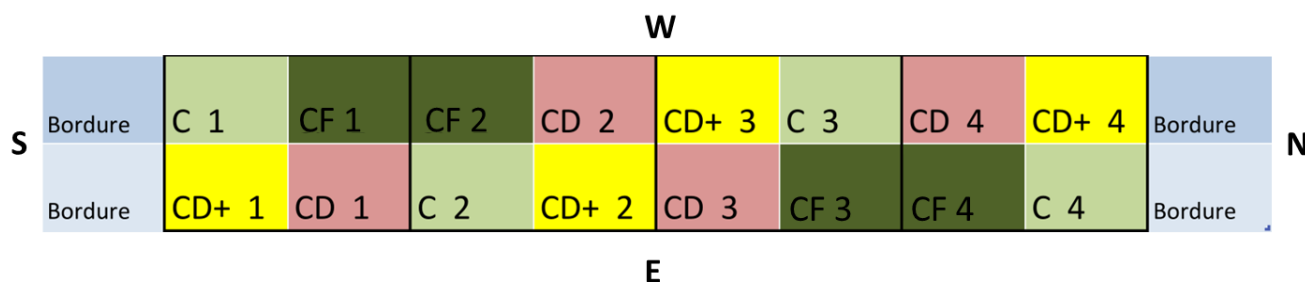


Figure 6 : Plan du dispositif expérimental.

Sur l'ensemble de l'expérience il y a 5 traitements différents :

- Colza pur forte densité, 30 plantes/m² : bacs C1, C2, C3, C4, CD+3 et CD+4 (Figure 7)

Colza pur, 30 pl/m²

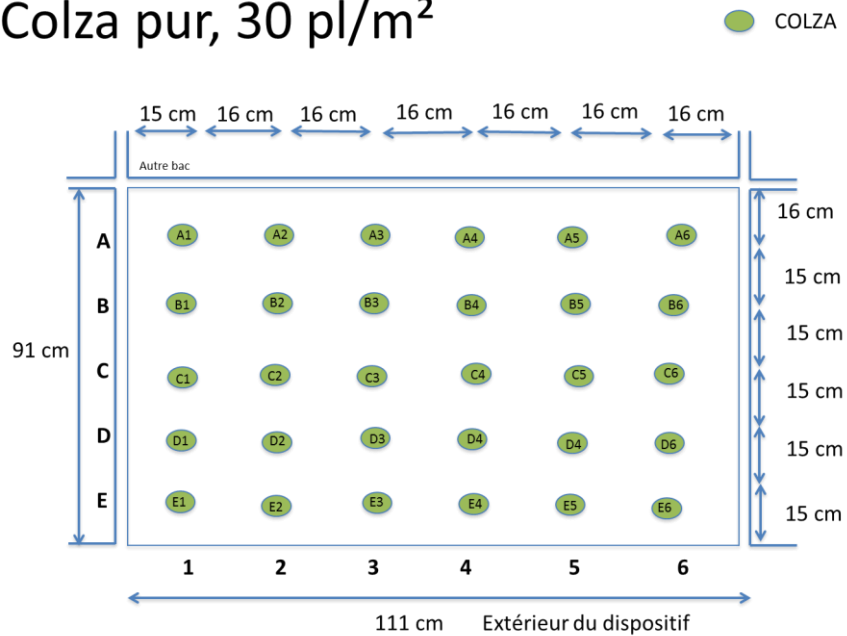


Figure 7 : Représentation schématique d'un bac de colza pur forte densité.

- Colza pur faible densité, 15 plantes/m² : bacs CD1, CD2 et CD4 (Figure 8)

Colza pur, 15 pl/m²

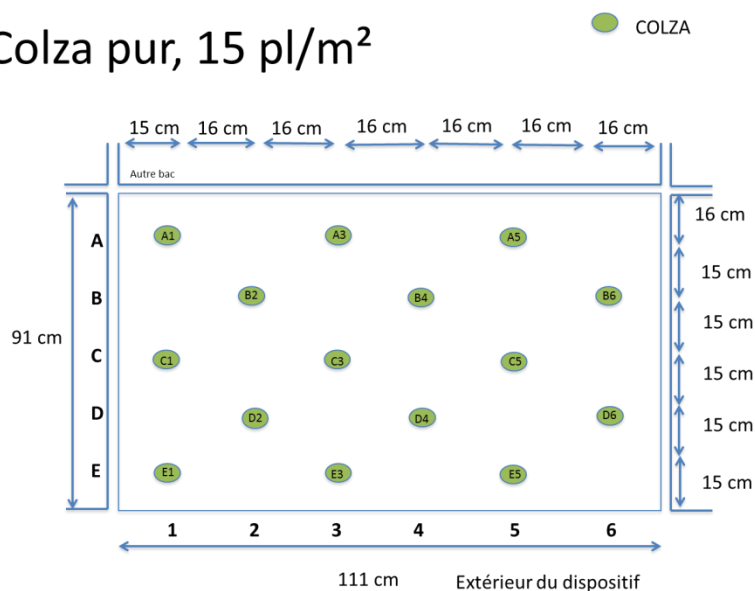


Figure 8 : Représentation schématique d'un bac de colza pur faible densité.

- Colza forte densité et LED blanches : bacs CD+1 et CD+2 (Figure 9)

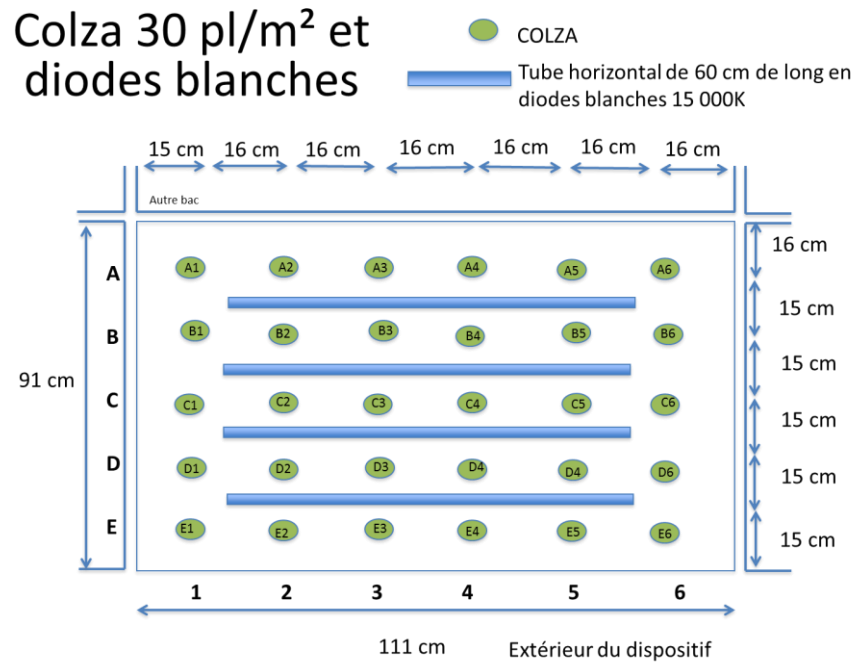


Figure 9 : Représentation schématique d'un bac de colza forte densité et LED blanches.

- Colza faible densité et LED rouge sombre (Rs) : bac CD3 (Figure 10)

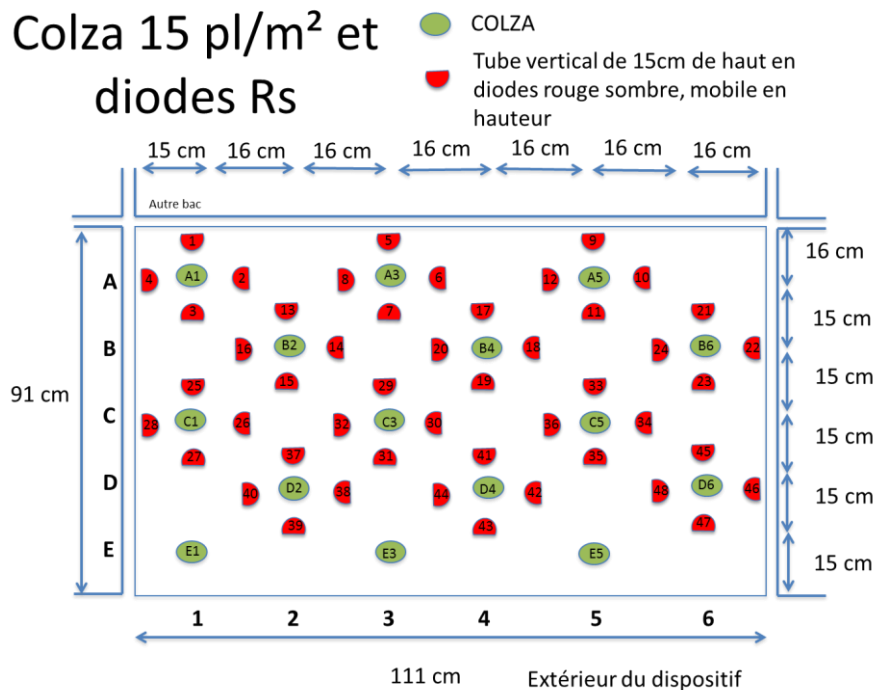


Figure 10 : Représentation schématique d'un bac de colza faible densité et LED Rs.

- Colza 15 pl/m² et féverole 15 pl/m² : bacs CF1, CF2, CF3 et CF4 (Figure 11)

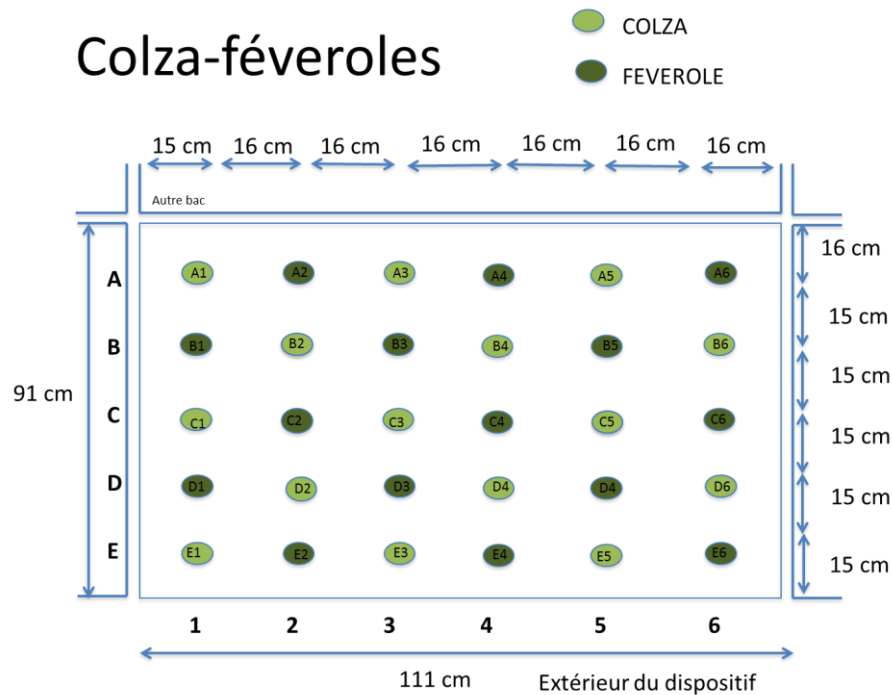


Figure 11 : Représentation schématique d'un bac de colza-féverole.

c. Les diodes électroluminescentes (LED)

Dans cette expérience trois bacs sont équipés d'émetteurs LED qui ont été conçues par Colasse SA (Seraing, Belgique). Le 2 mai 2016 (179,6 °C.jour), lorsque les colzas étaient au stade B9, des LED rouges sombres (Rs) ont été installées sur les plantes du bac CD3. Chaque plante ciblée (Figure 10) est entourée par 4 supports faisant 15 cm de longueur et constitués de 3 LED Rs (Image 1A). Le spectre de ces LED s'étend de 680 à 800 nm et leur pic est situé à 740 nm (rouge sombre). Les supports ont été fixés sur des piquets qui permettent d'ajuster leurs hauteurs lorsque les plantes grandissent. Au début de l'expérience les plantes étant encore au stade rosette l'ensemble de la plante subissait le traitement, lors de l'élongation de la tige la LED a été orienté sur un entrenœud cible (entre le numéro 12 et le 14) qu'on a suivi au cours de sa croissance.

Pour ce qui est des LED blanches, leurs supports mesurent 60 cm de long et il a 4 supports par bacs équipés (Figure 9 et Image 1B). Les bacs équipés sont les bacs CD+1 et CD+2. Ces LED éclairent dans le PAR, leur spectre s'étend de 400 à 700 nm. Ces barres de LED ont été installées le 17 mai 2016. La hauteur des LED blanches a également été ajustée au fur et à mesure de la croissance des plantes passant de 10 à 26 cm. Par contre, l'ajustement ne se faisait pas plante par plante cette fois ci mais globalement, étant donné qu'une barre de LED vise plusieurs plantes en même temps.

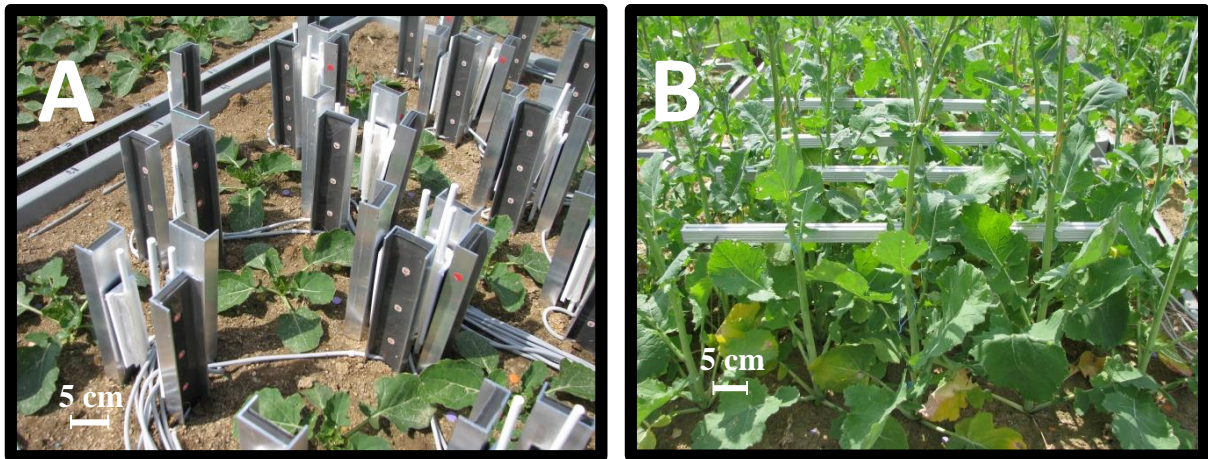


Image 1 : (A) Photo du dispositif LED Rs le jour de l'installation. Le colza était au stade B9. (B) Photo d'un bac 30 plantes/m² avec LED blanches (CD+2) lorsque les colzas étaient au stade de montaison. Les LED blanches éclairent vers le bas.

Afin d'étudier un effet de la présence du support de LED Rs sur la croissance des plantes, nous avons placé des supports sans LED dans un bac de bordure pour évaluer leur effet sur la croissance des plantes (Figure 12) que l'on appellera fausses LED. L'Image 2 montre une comparaison des LED Rs et des fausses LED Rs.

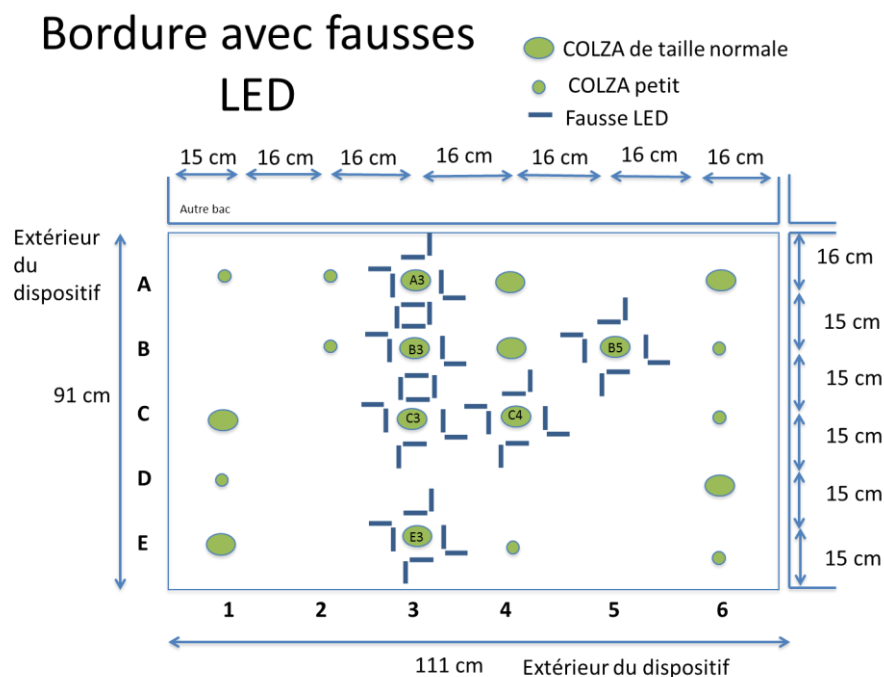


Figure 12 : Représentation schématique d'un bac de bordure avec des fausses LED Rs.

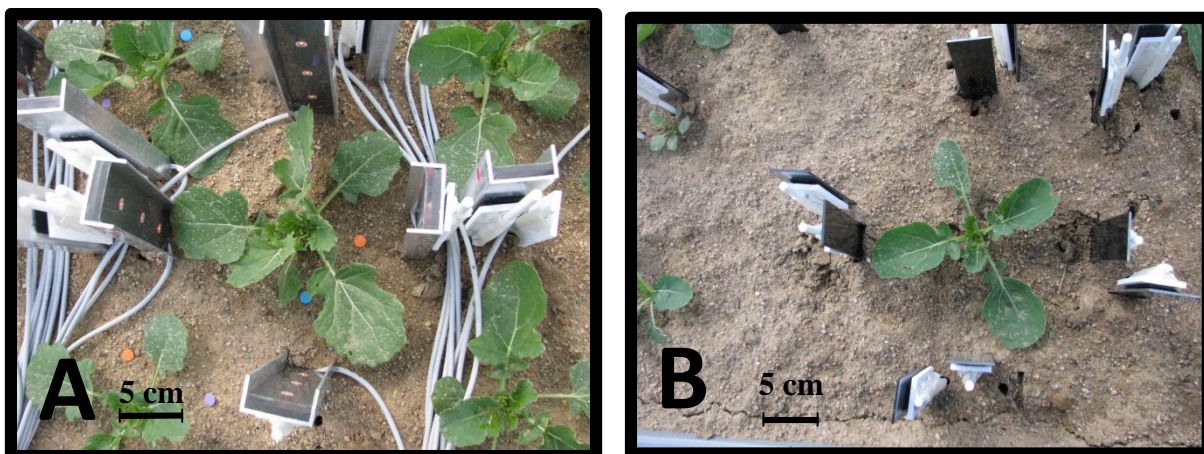


Image 2 : (A) Vu de haut d'une plante du dispositif LED Rs. (B) Vu de haut d'une plante du bac de bordure avec les fausses LED Rs.

II) Acquisition et analyse des données

a. Mesures non destructives

Une à deux fois par semaine depuis le 12 avril 2016 et jusqu'au 21 juin 2016, des mesures non destructives ont été réalisées. Nous avons commencé par compter le nombre de feuilles présentes et tombées en considérant comme présente une feuille dont la longueur est supérieure à 1 cm. A partir de la montaison, la hauteur des plantes a également été mesurée. Quant aux ramifications, une fois que les bourgeons axillaires commençaient à devenir feuillus et à s'allonger au niveau de la tige nous considérons qu'une ramification était présente. La longueur des ramifications a été mesurée à partir de 1cm.

Ces mesures répétées ont été complétées par des mesures ponctuelles d'architecture que sont l'angle d'insertion des feuilles par rapport à l'axe principal, la longueur des feuilles et la hauteur des entrenœuds. La longueur des feuilles a été utilisée pour estimer les surfaces foliaires à partir d'une relation calibrée entre la longueur et la surface foliaire sur un échantillon destructif (Annexe 2).

b. Mesures destructives

Plusieurs séances de prélèvements destructifs auxquelles j'ai participé ont eu lieu au cours de cette expérience, qui ont en tout duré 7 jours. Nous avons prélevé des bourgeons axillaires, des entrenœuds et des feuilles afin d'analyser leurs expressions de gènes et leurs hormones lors des deux premiers prélèvements. Les deux autres prélèvements avaient pour but de connaître les tailles et les masses sèches des organes des plantes selon les traitements. Les résultats n'étant pas encore disponible, dans ce rapport nous traitons uniquement les données non destructives.

c. Mesure de la composition spectrale de la lumière

Les organes végétaux perçoivent leur environnement lumineux de façon isotropique. Les capteurs hémisphériques permettent d'obtenir une mesure proche de ce que captent les plantes

car ils ont un angle hémisphérique de 180° d'ouverture sur 360° d'azimut, ce qui permet d'avoir une réponse équivalente quel que soit l'angle du rayonnement incident. Les capteurs de ce type existant dans le commerce sont encombrants et leur présence peut perturber l'architecture du couvert végétal et donc cet environnement pendant la mesure. C'est pourquoi l'UMR ECOSYS a développé un capteur de petite dimension en adaptant l'enveloppe et le diffuseur d'un capteur Li-190 (Li-cor, Lincoln, Nebraska USA) à un connecteur de fibre optique. Le capteur hémisphérique est relié par une fibre optique à un spectroradiomètre (UniSpec, PP-systems, Amesbury, Massachussets USA) qui décompose la lumière pour mesurer la qualité spectrale du rayonnement entre 300 et 1100 nm. L'acquisition des spectres se fait avec le logiciel UniWin.

Les mesures ont été réalisées le 3 mai 2016 lorsque les colzas étaient au stade B9 et le 8 juin 2016 lorsqu'ils étaient au stade floraison sur quatre plantes des bacs C2, CD+2, CD3, CF3, CD2 et sur six plantes d'un bac de bordure. Seules les données du 8 juin seront traitées dans ce rapport. Les plantes sélectionnées pour les mesures sont précisées dans le Tableau 1.

	Bacs C2, CD+2, CD3, CF3 et CD2	Bac de bordure
Plantes sélectionnées	B4, C5, D2 et D4	A3, B3, B5, C3, C4 et E3

Tableau 1 : Plantes sélectionnées pour les mesures de composition spectrale de la lumière selon les bacs.

Pour chaque plante, 4 mesures sont réalisées à la surface du sol, une à l'ouest, au nord, à l'est et au sud de chaque plante (Figure 13). Le 8 juin les plantes étant plus grandes, les mesures ont été réitérées à 20cm, à 40cm, à 60cm et à 80cm du sol. Le capteur était positionné au plus près de la plante et orienté vers le haut. Enfin, ces mesures ont été réalisées à plus ou moins deux heures du midi solaire, c'est-à-dire 14h en France métropolitaine en heure d'été.

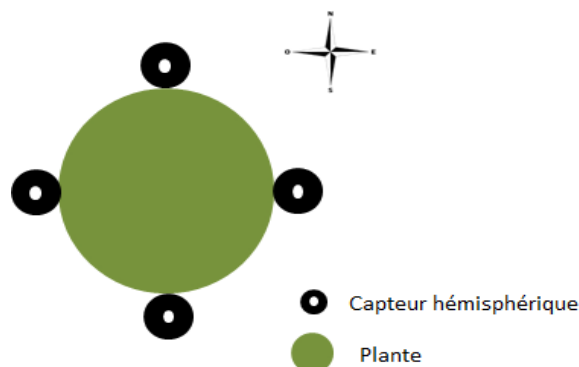


Figure 13 : Mesure de l'environnement spectral des colzas, vue de dessus.

d. Mesure de la température

Un suivi de la température du couvert des bacs munis de LED a été réalisé en parallèle, les résultats sont présentés en Annexe 3.

Les température moyennes journalières mesurées à la station météorologique de Grignon sont utilisées pour calculer les degré.jour, unité qui nous a servi comme échelle du temps dans le traitements des données. Nous avons utilisé une température de base égale à 4,5°C et la date de levée est le 22 mars.

e. Analyse des données

Les données récoltées lors des prélèvements non destructifs ont été analysées avec le logiciel RStudio et avec Excel. Dans chaque traitement nous avons moins de 30 plantes suivies, nous réalisons donc des tests de Kruskal-Wallis pour comparer les moyennes, qui sont des tests non-paramétriques. Ces tests sont réalisés avec l'outil développé sous Excel par la société AnaStats⁴.

Pour ce qui est des mesures de l'environnement lumineux des plantes, les fichiers bruts obtenus avec UniWin sont exploités dans l'application Qua2Ray (Roy, 2012) qui permet de calculer les différentes variables d'intérêt pour chaque spectre. Ces variables pour notre expérience sont les radiations photosynthétiquement actives (PAR) qui sont comprises entre 400 et 700 nm, le rouge clair (655-665nm) et le rouge sombre (725-735nm). Le Rc:Rs que nous utilisons est donc le rapport entre les longueurs d'ondes comprises entre 655 et 665 nm et celles comprises entre 725 et 735 nm.

f. Abréviations

La signification des abréviations employées dans ce rapport est représentée dans le Tableau 2.

Abréviation	Signification
LED	Diodes électroluminescentes
PAR	Radiations photosynthétiquement actives
Rc:Rs	Rapport rouge clair/rouge sombre
Rs	Rouge sombre

Tableau 2 : Signification des abréviations utilisées dans ce rapport.

⁴ Anastats.fr

RESULTATS

I) Caractérisation de l'effet des traitements

a. Modification de l'environnement

L'environnement a été modifié par les facteurs densités et présence ou absence de LED. Les variables environnementales susceptibles d'être modifiées sont la lumière, sa composition spectrale et la température. Les valeurs du Rc:Rs à différentes hauteurs dans le couvert sont représentées en fonction des traitements (Figure 14A). La décroissance la plus faible a été observée pour le traitement 15 plantes/m². La décroissance a été plus marquée pour les 30 plantes/m² avec LED blanches et les colza-féverole et elle a été la plus forte pour les traitements 30 plantes/m² et fausses LED. La comparaison des deux traitements faible densité nous permet d'observer que les LED Rs, situées entre 30-45 cm du sol selon les plantes, ont baissé le Rc:Rs mesuré à 40 cm de hauteur en dessous de 0,4. Plus bas, ce rapport augmente à nouveau et fini par atteindre la même valeur que le traitement sans LED. A 80 cm, le Rc:Rs le plus faible était observé pour le traitement avec les LED Rs alors que les LED se trouvent bien plus bas et que le bac est en faible densité. Ceci s'explique par le fait que les plantes de ce bac mesuraient environ 1 m alors que les autres environ 80 cm, donc à 80 cm il n'y avait plus d'ombrage hormis pour les plantes du bac avec LED Rs, ce qui a abaissé le Rc:Rs.

Quant au PAR, nous avons représenté le PAR transmis relatif à différentes hauteurs dans le couvert (Figure 14B), calculé comme le ratio entre les mesures de PAR transmis mesurées dans le couvert et celles de PAR incident, toutes deux étant en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Les plus fortes diminutions entre le haut et le bas du couvert sont observées pour les 30 plantes/m², 30 plantes/m² LED blanches, colza-féverole et fausses LED. Les LED blanches placées à 26 cm du sol ne semblent pas modifier le PAR. Pour le traitement avec LED Rs, nous observons qu'à 80 cm c'était le bac avec le plus faible PAR du fait de la grande taille des plantes. La valeur observée à 40 cm est également étonnamment faible, il s'agit sûrement d'un effet ombrage du support des LED Rs situé à cette hauteur.

Enfin, à l'aide de mesures réalisées dans les bacs avec LED Rs et blanches nous pouvons affirmer que les différents traitements ne modifient pas la température de l'air (Annexe 3).

Les LED Rs ont donc abaissé le Rc:Rs localement et les supports on légèrement abaissés le PAR via un effet ombrage, phénomène qui n'est pourtant pas observé avec le traitement fausses LED. Les LED blanches ont quant à elles un Rc:Rs légèrement plus élevé que celui de leur témoin (30 plantes/m²) dû à l'ajout de rouge clair, en revanche elles n'ont pas modifié le PAR (Tableau 3).

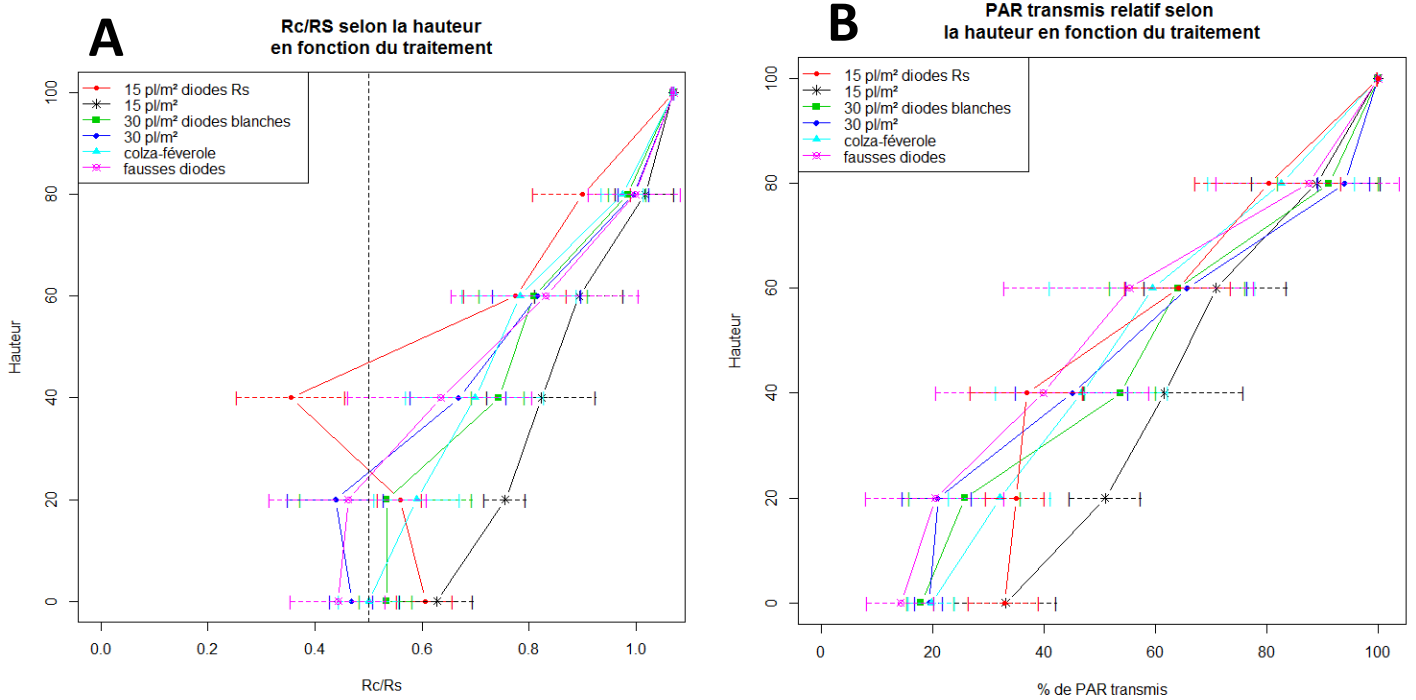


Figure 14 : (A) Modification du Rc:Rs moyen par les différents traitements selon la hauteur. Une droite en pointillé verticale est tracée à 0,5, valeur critique de Rc:Rs. (B) Le PAR transmis relatif moyen à différentes hauteurs dans le couvert en fonction des traitements. La valeur à 100 cm correspond à celle au-dessus du couvert. Les droites reliant chaque moyenne ne sont que des interpolations afin de faciliter la lisibilité des graphiques, nous ne savons pas comment se comporte le rayonnement entre deux points.

	Forte densité	Forte densité LED blanches	Faible densité	Faible densité LED Rs	Colza-féverole	Fausses LED
Quantité de lumière (PAR) (cf. Figure 1B)	-	-	+++	+	-	-
Qualité de la lumière (Rc:Rs) (cf. Figure 1A)	< 0,5 à la surface du sol et à 20 cm du sol, sinon > 0,5	> 0,5	> 0,6	< 0,4 à 40 cm de hauteur sinon > 0,5	> 0,5	< 0,5 à la surface du sol et à 20 cm du sol, sinon > 0,5

Tableau 3 : Récapitulatif des modifications de l'environnement par les différents traitements.

b. Effet sur la phénologie et l'architecture des plantes

Il s'agit désormais d'analyser l'effet des différents traitements sur la phénologie des plantes afin d'évaluer les différences qu'ils induisent et de savoir si les plantes comparées sont bien au-même stade phénologique. Les dynamiques de nombre de feuilles, hauteur des plantes et

nombre de ramifications indiquent que les plantes ont des situations initiales identiques mais que des différences se mettent en place au cours du temps sur les valeurs maximales (Figure 15). Afin de regarder si ces différences sont significatives ou non, nous nous sommes concentré sur les valeurs maximales des variables nombre de feuilles produites, hauteur des plantes, nombre de ramifications (mesures du 21 juin (686,7 °C.jour) qui sont les dernières mesures réalisées).

Pour le nombre total de feuilles (Figure 16A), le test de comparaison de moyenne n'est pas significatif au risque 5% mais il l'est au risque 11%. Pour la hauteur finale des plantes (Figure 16B), le test est significatif au risque 5%. Les comparaisons deux à deux montrent que les hauteurs des traitements 15 plantes/m² avec et sans LED Rs sont significativement différentes : les plantes du bac 15 plantes/m² LED Rs sont plus grandes que celles du bac 15 plantes/m² sans LED. Il y a également une différence significative entre les plantes des traitements 30 plantes/m² et 15 plantes/m², ces dernières étant plus petites. Les plantes du bac colza-féverole sont significativement plus petites que les plantes du traitement LED Rs et que les 30 plantes/m². Enfin, le nombre de ramifications par traitements (Figure 16C) n'est pas significatif au risque 5%.

Il semblerait donc que l'effet des traitements joue principalement sur la hauteur des plantes et sur le nombre total de feuilles, plus important pour les 15 plantes/m² LED Rs que pour les 15 plantes/m² sans LED. Ici les ramifications sont considérées qualitativement, nous avons regardé leur présence avec un seuil à 2 cm, or il serait intéressant de les étudier quantitativement, c'est-à-dire d'étudier leur longueur moyenne par entrenœud.

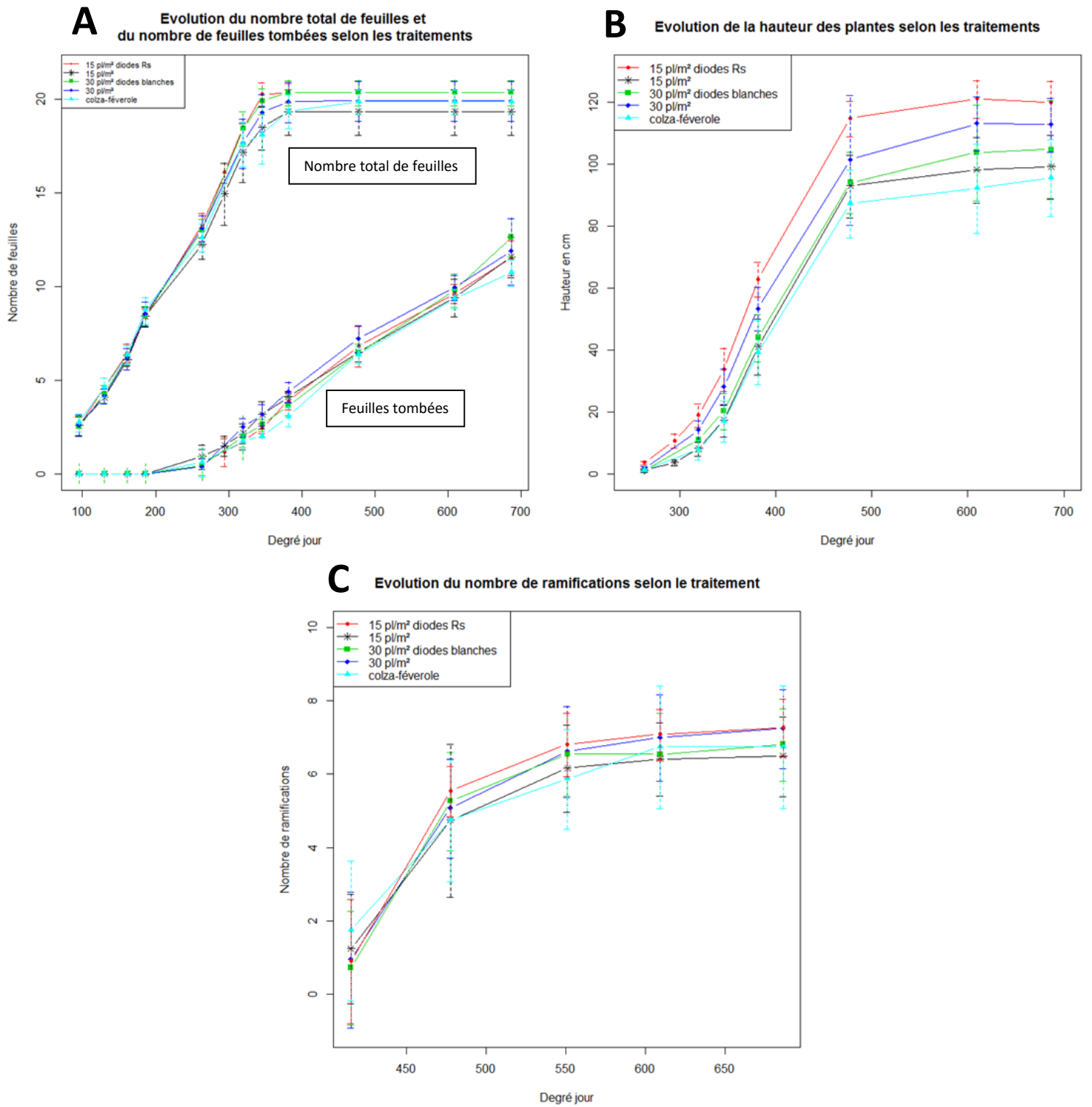


Figure 15 : Evolution du nombre total de feuilles et du nombre de feuilles tombées (A), de la hauteur des plantes (B) et du nombre de ramifications (C) selon les traitements.

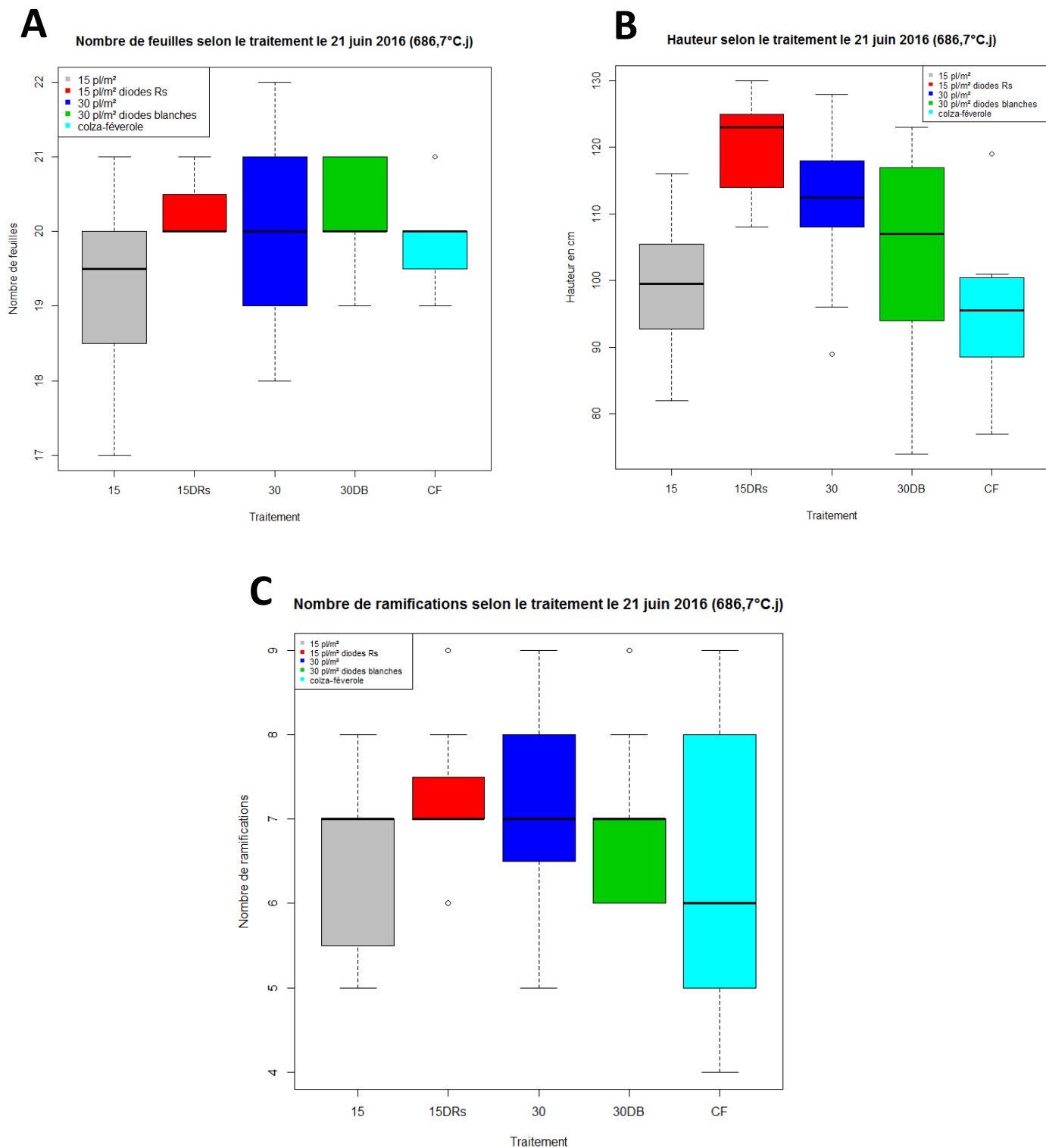


Figure 16 : Boîtes à moustaches représentant le nombre total de feuilles (A), la hauteur (B) et le nombre de ramifications (C) final selon les traitements. Les plantes du bac équipé par les LED Rs sont significativement plus grandes que celles de leur bac témoin (15 plantes/m²) et les plantes sont significativement plus grandes en forte densité sans LED qu'en faible densité sans LED.

L'état initial des plantes n'étant pas différent, les traitements ont bien modifié l'environnement lumineux de manière découplée PAR et Rc:Rs et ils ont modifié la phénologie et l'architecture de la plante : le traitement Rs en faible densité a augmenté le nombre de feuilles et la hauteur par rapport à la faible densité, produisant des plantes d'un phénotype similaire à celui des plantes en forte densité (Figure 17).

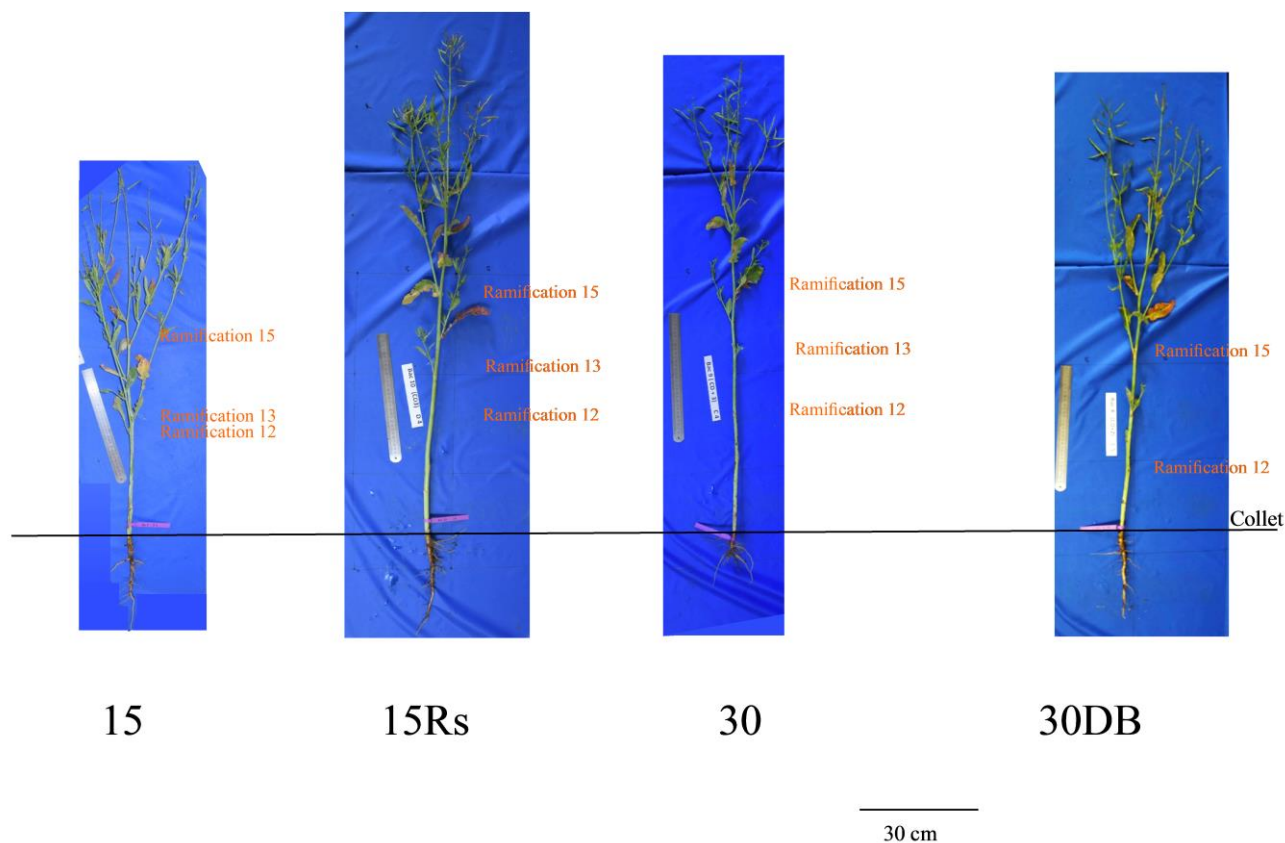


Figure 17: Comparaison de l'architecture des plantes selon les traitements au stade final. L'emplacement des ramification 12, 13 et 15 est précisé. Les plantes les plus petites sont les plantes en faible densité (15), puis les plantes en forte densité avec LED blanches (30DB), puis les forte densité (30) puis les plus grande sont les plantes en faible densité LED Rs (15Rs). Les 15Rs et 30 ont des phénotypes similaires, au niveau de la taille mais également au niveau de la hauteur des entrenœuds.

Une conclusion est que la modification de la hauteur des plantes fait que les ramifications portées par un même numéro de phytomère entre deux traitements ne seront pas forcément à la même hauteur et donc pas dans le même environnement lumineux : nous ne pourrons donc pas les comparer directement deux à deux. Cela implique de réaliser une analyse topologique détaillée comme suit.

II) Analyse topologique de l'architecture des plantes

La Figure 18 représente les longueurs moyennes finales des ramifications en fonction de leur hauteur sur la tige mesurée à la fin de l'élongation. Le numéro de l'entrenœud porteur est précisé en chaque point. Le profil général observée est d'abord une longueur de ramification

qui augmente avec la hauteur d'insertion sur la tige jusqu'à un maximum, puis une diminution.

Pour les plantes à 15 plantes/m² (Graphique A), nous observons que le profil de longueurs de ramifications est différent entre les traitements avec et sans LED Rs. Ce décalage commence à partir de l'entrenœud 12 pour lequel les plantes avec LED Rs n'ont pas de ramifications démarrées alors que sur l'autre bac si. Ce décalage s'observe et s'agrandit jusqu'à la fin où l'entrenœud 18 du bac avec LED Rs est au même niveau que l'entrenœud 20 du témoin. Les ramifications les plus longues correspondent à l'entrenœud 16 et se situent vers 50 cm de hauteur pour le traitement sans LED alors qu'elles correspondent à l'entrenœud 17 et se situent vers 70 cm pour le traitement LED Rs.

Pour les plantes à 30 plantes/m² (Graphique B), les traitements avec et sans LED blanches sont proches l'un de l'autre et sont plus haut que le profil du 15 plantes/m². Cependant, il y a un décalage d'un entrenœud, à la fois dans la hauteur des entrenœuds et dans la longueur des ramifications. En effet, l'entrenœud 12 du traitement sans LED se trouve à la même hauteur que l'entrenœud 13 du traitement LED blanches et leurs longueurs de ramifications sont équivalentes. Les LED blanches auraient simplement eu un effet sur la hauteur des plantes, donc des entrenœuds, mais pas sur le démarrage des ramifications. Dans la partie précédente, nous n'avions pas réussi à mettre en évidence de différence significative de hauteur entre les traitements fore densité avec et sans LED blanches car seules les données les données finales ont été traitées. La Figure 17B nous montre donc qu'il existe bien une différence de hauteur entre les deux traitements, que les premiers entrenœuds des plantes du bac LED blanches sont plus bas que ceux des plantes du bac 30 plantes /m² sans LED.

La comparaison les deux densités entre elles, à 30 plantes/m² (Figure 18B) c'est la hauteur de l'entrenœud qui détermine la longueur de sa ramification indépendamment de son numéro. En revanche, à 15 plantes/m² (Figure 18A), l'enrichissement en Rs remonte le profil de ramification et ce n'est plus la hauteur qui est structurante. Ce phénomène se répercute sur toutes les ramifications de la plante et c'est ce qui provoque ce décalage de profil entre les traitements. Nous parlons de décalage car la somme des longueurs moyennes des ramifications sur la plante entière est similaire pour les deux traitements (225 +/- 43,1 cm pour le traitement LED Rs et 241,2 +/- 77,4 cm pour son témoin). Nous pouvons donc dire qu'à l'échelle de la plante la ramification a été similaire entre les deux traitements.

Enfin, une augmentation de la densité provoque un décalage du profil de ramification vers le haut similaire à celui provoqué par les LED Rs. Cet effet est cohérent avec le fait que l'augmentation de densité augmente la surface verte du couvert et donc réduit le Rc:Rs *via* une plus grande absorption du rouge clair. En revanche, l'ajout de LED blanches dans le couvert à 30 plantes/m² n'a pas provoqué l'élongation des ramifications basales.

Dans tous les cas, à partir d'une certaine hauteur sur la tige, les longueurs de ramifications diminuent à nouveau. Quel que soit le traitement, cette diminution concerne les quatre ou cinq ramifications apicales avant l'inflorescence principale.

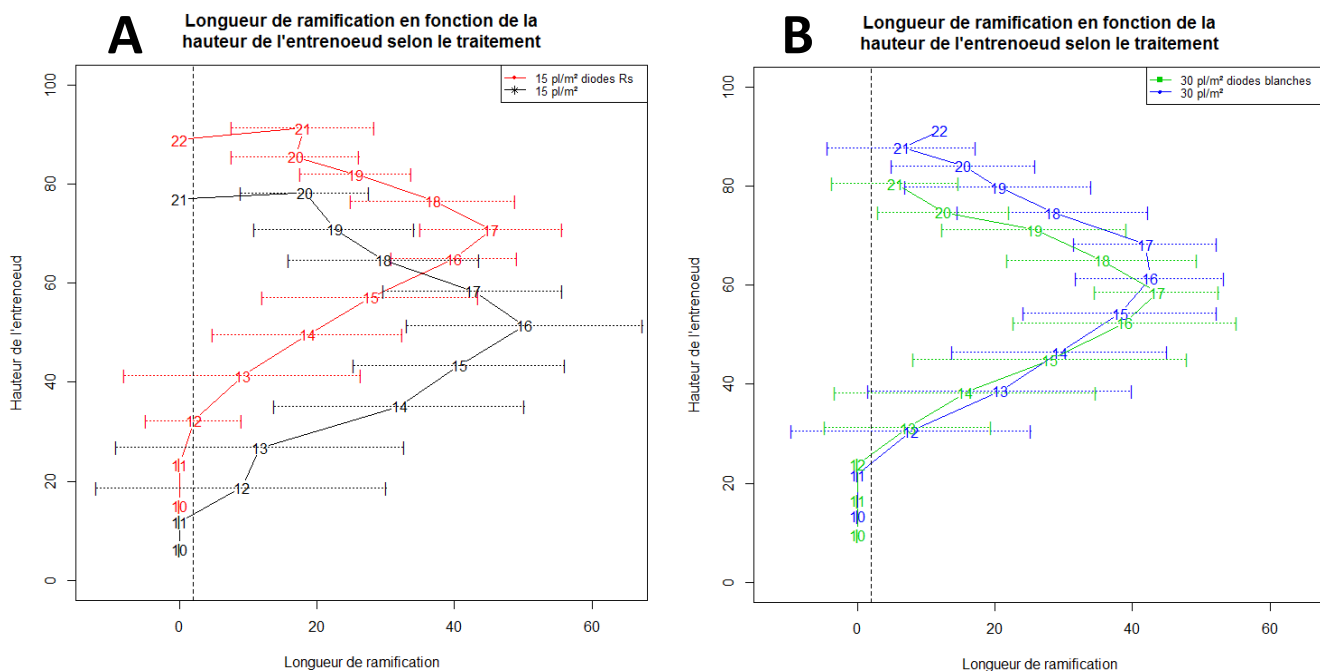


Figure 18 : Représentation topologique de la longueur moyenne d’une ramification en fonction sa hauteur sur la tige. Le symbole de chaque point indique le numéro de l’entre-nœud porteur. Les traitements faible densité avec et sans LED Rs sont représentées sur le graphique A et les traitements forte densité avec et sans LED blanches sont représentés sur le graphique B. La droite verticale en pointillés représente le seuil de longueur de ramification de 2 cm à partir duquel nous considérons qu’une ramification est démarrée. Les LED Rs sont positionnées entre 30 et 40 cm. Décalage du profil avec les LED Rs et avec la densité. Sans LED Rs la hauteur est structurante du profil de ramification.

Nous nous sommes également intéressés à l’angle d’insertion des feuilles sur la tige principale (Figure 19) et à la surface foliaire par plante selon les traitements. Les angles d’insertion sont significativement différents à 5% pour les feuilles 5 à 8 et 10. Ces feuilles ont un angle d’insertion plus faible pour les traitements LED Rs et forte densité, elles sont donc plus érigées. Pour les surfaces foliaires (Annexe 4), une grande variabilité des données liée à un faible échantillonnage (4 plantes par bacs) rend la conclusion sur un effet des traitements difficile.

L’analyse topologique illustre bien l’effet des traitements sur l’insertion des feuilles sur la tige principale et leur effet sur le profil de ramification des plantes donc l’interaction entre les effets hauteur, longueur de ramification et Rc:Rs. Cependant, les LED Rs se trouvent entre 30 et 45 cm de hauteur et visent les entre-nœuds 12, 13, 14 ou 15 en fonction des plantes, la position des LED ayant été adapté plante par plante en fonction des ramifications déjà démarrées. Il y a donc une variabilité inter-plante non négligeable. Ce qui suit traite donc chaque plante du traitement Rs indépendamment afin de pouvoir analyser plus précisément l’effet de cet enrichissement en Rs sur les longueurs des ramifications.

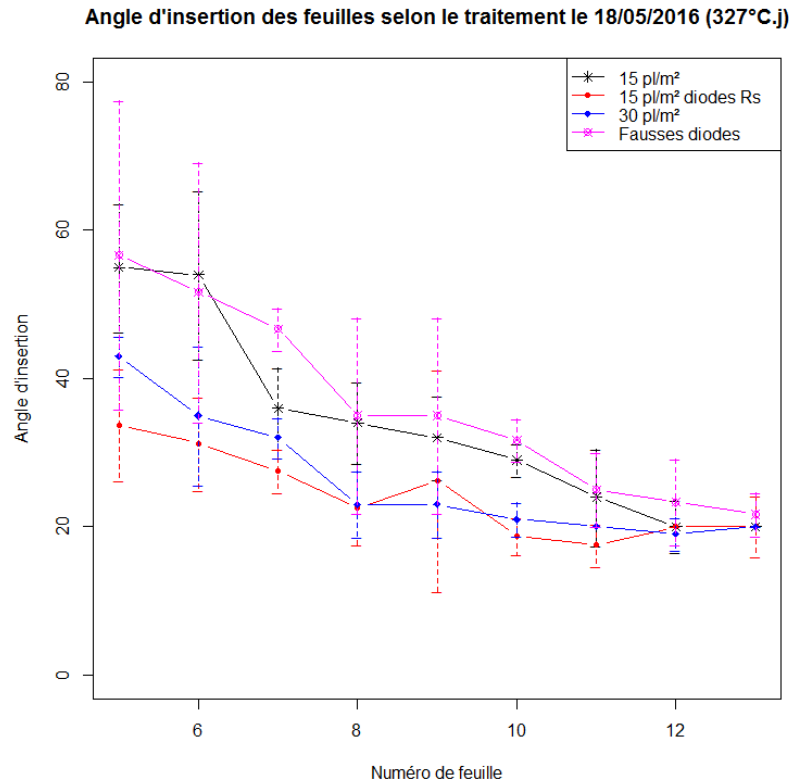


Figure 19 : Graphique représentant l'angle d'insertion moyen des feuilles selon le traitement le 18 mai. Cet angle est mesuré par rapport à la tige principale, plus il est faible plus la feuille est érigée. Les LED Rs baissent cet angle tout comme une augmentation de la densité, les feuilles sont plus érigées.

III) Analyse des liens longueur de ramification/Rc:Rs

a. Cas des LED Rs

Il s'agit désormais de s'affranchir de la variabilité inter-plante et d'étudier les plantes individuellement, en tenant compte de la position des LED Rs. Les longueurs de ramifications de 11 plantes de ce bac sont suivies mais pour alléger le document nous avons choisi de ne présenter les résultats que pour une plante représentative du bac (D2), les résultats obtenus sur les autres plantes étant identiques (Annexe 5) mis à part pour la plante D6, pour lequel le déplacement des LED en fonction de l'élongation de la tige n'a pas pu être correctement réalisé.

La Figure 20A représente la longueur finale des ramifications en fonction de leur hauteur sur la tige et le numéro de l'entrenœud porteur est précisé en chaque point ainsi que l'entrenœud visé par les LED Rs qui est entouré par un cercle rouge. En parallèle la Figure 20B représente la longueur des ramifications selon le rapport Rc:Rs. Pour réaliser ce graphique nous avons utilisés les données de Rc:Rs en fonction de la hauteur pour ce traitement. Une interpolation linéaire entre les mesures de Rc:Rs réalisées à différentes hauteurs a donc été réalisée pour estimer la valeur de ce rapport à chaque entrenœud de la plante en fonction de leur hauteur. Nous pouvons donc observer sur la figure 20B que la valeur du Rc:Rs de l'entrenœud visé par les LED est inférieur à 0,5 et que les ramifications ne sont pas démarrées. Ce phénomène

s'observe également sur les autres plantes du bac (Annexe 5). Nous avons donc bien un effet bloquant du Rs sur le démarrage des ramifications.

Il est intéressant de comparer la Figure 19 avec les données de faible densité sans LED (Figure 18A). En effet, l'entrenœud visé par les LED Rs se trouve à plus de 40 cm et il n'y a pas d'élongation de la ramification, cas de figure très différent des plantes en faible densité sans LED qui ont à cette même hauteur des ramifications de 40 cm en moyenne. Nous pouvons encore mettre en évidence que la hauteur n'est plus structurante du profil de ramification lorsque le Rc:Rs est diminué.

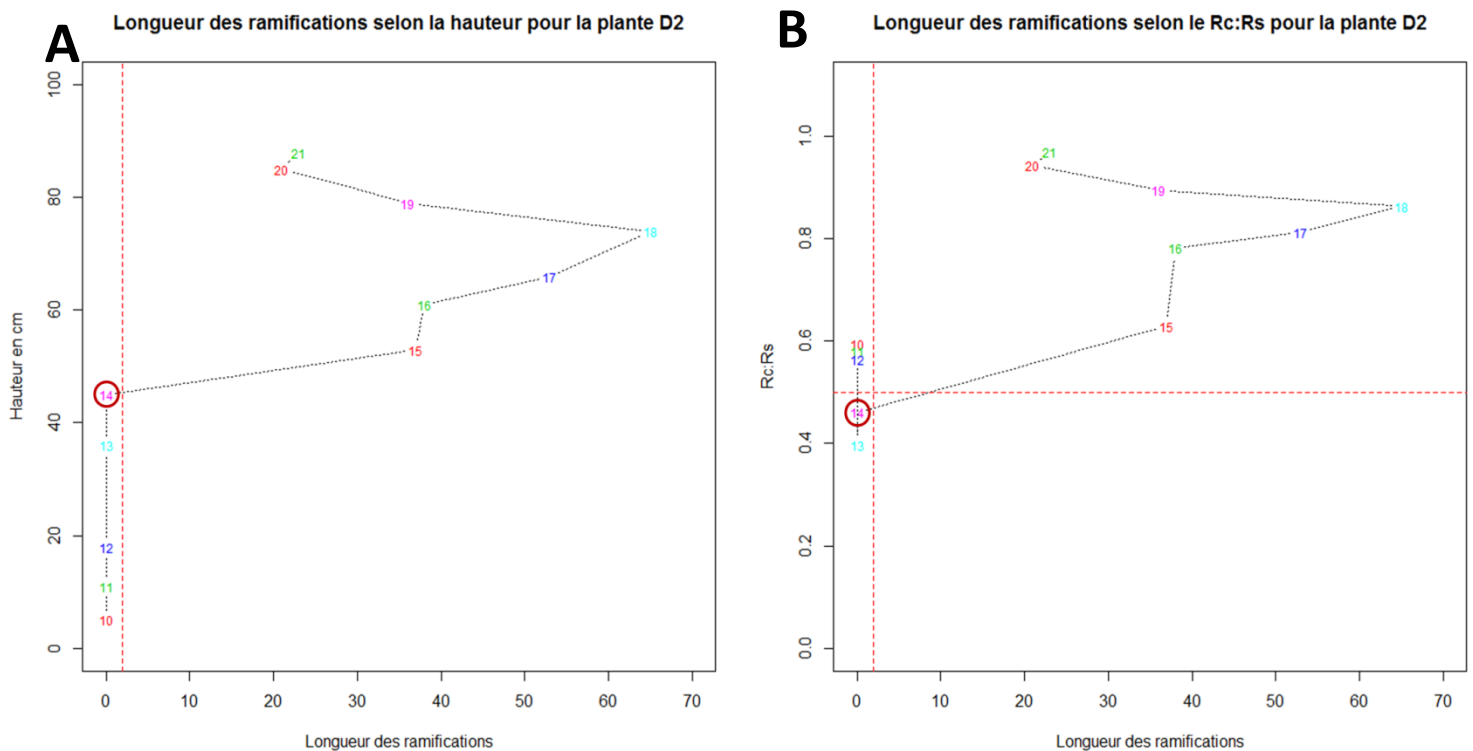


Figure 20 : Longueur des ramifications selon la hauteur (A) et selon le Rc:Rs (B), avec la précision du numéro de l'entrenœud, pour une des plante du traitement 15 pl/m² avec LED Rs. Le cercle rouge désigne l'entrenœud visé par le dispositif LED Rs.

b. Extrapolation pour les autres traitements

Le travail d'interpolation linéaire des valeurs mesurées de Rc:Rs pour chaque entrenœud n'a pas été fait pour les autres traitements par manque de temps. En revanche nous pouvons tout de même émettre des conclusions sur les résultats des élongations des ramifications selon les traitements grâce à nos données (Tableau 4).

	PAR	Rc:Rs	Hauteur	Résultat élévation et ramification
Faible densité	++	+	0	Ramifications entre 20 et 80 cm de hauteur
Faible densité LED Rs	+	--- à 40 cm	++	Blocage de l'élévation de la ramification portée par l'EN visé, élévation des tiges et production d'un EN ramifié supplémentaire en haut de la plante : ramifications entre 40 et un peu plus de 90 cm
Forte densité	-	--	+	Élévation des tiges par rapport au traitement faible densité, profil de ramification remonté plus haut : ramifications entre 30 et un peu moins de 90 cm
Forte densité LED blanches	-	-	-	Un entre-nœud de décalage par rapport au témoin mais profil de ramification identique en fonction de la hauteur : ramifications entre 30 et 80 cm

Tableau 4 : Extrapolation des conclusions faites pour le traitement LED Rs aux autres traitements en fonction de leur environnement lumineux.

DISCUSSION

Cette expérience a été réalisée dans l'optique de comprendre si les LED permettent de modifier indépendamment qualité et quantité de lumière au sein d'un couvert et d'identifier le rôle respectif de ces deux variables sur la ramification. Nous avons donc commencé par analyser les effets de nos différents traitements sur la qualité et la quantité de lumière pour pouvoir interpréter les mesures non destructives de phénologie et de topologie, en se concentrant sur la ramification.

I) Modification de la qualité et de la quantité de lumière

Une comparaison de l'environnement lumineux selon les traitements nous a permis de mettre en évidence que les LED Rs abaissaient fortement le Rc:Rs, et ce de manière locale. Le PAR mesuré dans le bac 15 plantes/m² avec LED Rs était un peu plus faible que dans le bac témoin. Nous avons expliqué cela par l'effet ombrage du support. Or avec les LED Rs notre but était de modifier la qualité de la lumière sans modifier le PAR, il aurait donc fallu que nous obtenions un profil de PAR équivalent pour les deux traitements. Malheureusement cet effet ombrage est un phénomène dont il semble dur de s'affranchir. Nous avons tenté d'analyser l'effet du support en utilisant un bac de bordure et en y installant des fausses LED, qui auraient donc simulé uniquement l'effet ombrage. Mais ces fausses LED étaient moins volumineuses que les supports des LED Rs, donc l'effet ombrage était moindre. De plus, les plantes de bordure étaient plus grosses et leur densité était irrégulière et différente de celle des plantes des bacs suivis. A l'avenir, l'idée serait de garder ce principe de fausses LED, mais en utilisant un bac à 15 plantes/m² identique au bac avec LED Rs et les fausses LED devront être des LED Rs éteintes. Ainsi même si le PAR est légèrement modifié via l'ombrage, nous pourrions comparer les profils de ramifications du traitement 15 plantes/m² LED Rs à celui des plantes du traitement 15 plantes/m² fausses LED, et les différences ne pourront être attribuées qu'à l'enrichissement en Rs, donc à la baisse du Rc:Rs.

Au sujet du PAR nous avons pu observer un effet densité en bas du couvert comme nous l'attendions. En effet ce PAR est plus faible pour les traitements forte densité avec et sans LED blanches, fausses LED et colza-féverole que pour les 15 plantes/m² avec et sans LED. En revanche les LED blanches n'ont pas augmenté le PAR comme nous l'avions imaginé dans la problématique. Nous pensons que les LED étaient peut-être trop basses et que le bas du couvert n'était pas suffisamment ombré pour qu'un ajout de PAR modifie de manière significative la quantité de lumière atteignant le bas du couvert. Une idée serait d'utiliser deux barres de LED blanches par rang, chacune dirigées vers un côté différent afin d'éclairer la tige principale plutôt que le sol.

Une proposition à l'avenir serait de réaliser ces mesures de quantité et qualité de lumière toujours proche du midi solaire, mais de manière répétée sur plusieurs jours afin d'améliorer la sensibilité de la mesure du rayonnement et donc d'avoir des mesures les plus représentatives possibles. Le signal dépendant énormément des conditions de mesures, une autre solution pour pouvoir étudier l'effet de différentes qualité et quantité de lumière sur la morphogénèse est d'utiliser la modélisation (Chelle *et al.*, 2007).

II) Modification de la phénologie et de la topologie

Des mesures de nombre de feuilles, de hauteur de plantes et de longueurs de ramification ont été réalisées pendant la croissance des plantes. En analysant les résultats nous avons réussi à mettre en évidence que les plantes du traitement 15 plantes/m² avec LED Rs étaient significativement plus grandes que les plantes du bac témoin. Les LED ayant été installées lorsque les plantes étaient encore au stade rosette, le Rs a provoqué le redressement des feuilles et l'élongation des entrenœuds. Ces deux phénomènes correspondent au syndrome d'évidement de l'ombrage ou « Shade Avoidance Syndrome » (Casal, 2012) et nous retrouvons donc ce qui a pu être observé lors de l'expérience conduite à ECOSYS en plante isolée (Jullien *et al.*, 2015).

Si nous nous intéressons à la phénologie, nous remarquons que la valeur maximale du nombre de feuilles produite est significativement différente en fonction des traitements à 11%. En effet nous pouvons observer une différence d'une demi-feuille pour le bac avec les LED Rs. Cette différence se retrouve au niveau du nombre d'entrenœuds où nous avons pu observer qu'en moyenne, en haut de la plante, les plantes entourées de Rs ont un entrenœud en plus que celles du bac témoin. Comme la ramification commence un entrenœud plus tard finalement le nombre de ramification est identique (médiane=7). Ce phénomène est à rapprocher du résultat observé par Rondanini *et al.* (2014) : ces auteurs avaient montré qu'un faible Rc:Rs perçu depuis les stades végétatifs augmentait le nombre de ramifications, conclusion qui nous semblait étonnante. Dans notre étude seul le nombre d'entrenœuds, donc le nombre potentiel de ramifications, a été augmenté.

L'analyse topologique a montré que la baisse locale du Rc:Rs a inhibé le démarrage du bourgeons axillaire, comme montré chez les plantes horticoles (Demotes-Mainard *et al.*, 2015). L'analyse des expressions de gènes des bourgeons récoltés lors des prélèvements destructifs serait vraiment intéressante afin de comprendre les changements liés à cet ajout de Rs. Si les changements d'expression de gènes liés à l'ajout de Rs se révèlent être identique à ceux des bourgeons en fonction de la position dans le couvert, alors la qualité de la lumière se révélerait être le facteur limitant à l'élongation de ces bourgeons axillaires. Cette étude qui n'a pas pu être réalisée dans le temps du stage sera fait ultérieurement sur la base des bourgeons prélevés et congelés en cours d'expérimentation.

Des données de matières sèches ont également été récoltées et il serait intéressant de comparer leur répartition en fonction des traitements.

La diminution de la longueur des ramifications au sommet de la plante est cohérente avec les profils de ramification classiquement observés chez le colza (Jullien *et al.*, 2011). Elle ne semble pas pouvoir être reliée à l'environnement lumineux ni à la densité. Elle dépend plus probablement du phénomène de dominance apicale qui s'exprime de manière de plus en plus forte au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'apex terminal de la plante. Les phénomènes de régulation de l'élongation des ramifications en fonction de la lumière semblent plutôt concerner la partie basale de la plante comme c'est le cas pour d'autres espèces de grandes cultures comme le blé où le tallage est sensible à la densité et au Rc:Rs (Moeller *et al.*, 2014).

Enfin, il est important de souligner la très forte pluviométrie des mois d'Avril et Mai (Annexe 6) et l'abondance de méligèthes. Les boutons floraux ont été fortement abîmés et il n'y a que très peu de siliques qui ont été produites. Cela a pu avoir au moins deux types de conséquences : (i) les siliques n'ont pas ombré le couvert et la compétition pour la lumière et l'effet Rs attendus en forte densité n'a pas eu lieu, (ii) la compétition pour les assimilés entre ramification et croissance des siliques a également été atténuée. Les différences entre les deux densités auraient sans-doute été plus fortes en condition normale.

En mettant en commun les résultats que nous avons obtenus au cours de cette expérience et ce qui est connu dans la littérature nous pouvons réaliser un tableau récapitulatif de l'interprétation des résultats obtenus (Tableau 5).

	PAR	Rc:Rs	Hauteur	Résultat élancement et ramification	Hypothèse
Faible densité	++	+	0	Ramifications entre 20 et 80 cm de hauteur	Pas de compétition pour la lumière et pas de baisse du Rc:Rs
Faible densité LED Rs	+	--- à 40 cm	++	Blocage de l'élancement de la ramification portée par l'EN visé, élancement des tiges et production d'un EN ramifié supplémentaire en haut de la plante : ramifications entre 40 et un peu plus de 90 cm	Se comporte comme une plante en forte densité + blocage des premières ramifications donc ramifications qui se forment jusqu'à très haut
Forte densité	-	--	+	Élancement des tiges par rapport au traitement faible densité, profil de ramification remonté plus haut : ramifications entre 30 et un peu moins de 90 cm	Compétition pour la lumière : léger décalage du profil vers le haut mais pas de blocage de ramification
Forte densité LED blanches	-	-	-	Un entrecroisement de décalage par rapport au témoin mais profil de ramification identique en fonction de la hauteur : ramifications entre 30 et 80 cm	Légèrement moins de compétition pour la lumière qui se traduit par des plantes plus petites

Tableau 5 : Extrapolation des conclusions faites pour le traitement LED Rs aux autres traitements en fonction de leur environnement lumineux et explications hypothétiques.

CONCLUSION

En somme, une plus forte densité a bien diminué le PAR de manière plus importante lorsque l'on se dirige vers le bas du couvert qu'une plus faible densité et les LED Rs ont baissé le Rc:Rs de manière locale en dessous de 0,4, par contre elles ont légèrement baissé le PAR au niveau du support via un effet ombrage. Les LED Rs permettent donc de modifier indépendamment qualité et quantité de lumière au sein d'un couvert, il faut toutefois accorder une attention particulière à l'effet ombrage du support et utiliser un faux témoin afin d'analyser si cette légère baisse de PAR a un effet ou non sur l'architecture des plantes. Cet enrichissement en Rs a bien eu comme conséquence de bloquer les ramifications des entrenœuds visés. La densité quant à elle *via* son effet sur l'élongation des entrenœuds, sa diminution de Rc:Rs et son faible PAR a vu son profil de ramification se décaler vers le haut. L'ajout de PAR *via* les LED blanches n'a pas été mesuré par notre équipement mais une baisse de l'élongation des entrenœuds a été mesurée, phénomène type d'une baisse de compétition pour la lumière, mais le profil de ramification en fonction de la hauteur n'a pas bougé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Casal, J. J. (1988). Light quality effects on the appearance of tillers of different order in wheat (*Triticum aestivum*). *Ann. Appl. Biol.*, *112*, 167–173.
- Casal, J. J. (2012). Shade avoidance. In *The Arabidopsis book / American Society of Plant Biologists* (Vol. 10, p. e0157). <http://doi.org/10.1199/tab.0157>
- Chelle, M. *et al.* Simulation of the three dimensional distribution of the red:far-red ratio within crop canopies. *New Phytol.* **176**, 223–234 (2007).
- Demotes-Mainard, S., Péron, T., Corot, A., Bertheloot, J., Gourrierc, J. Le, Travier, S., ... Sakr, S. (2015). Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*. <http://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.010>
- Jullien, A., Mathieu, A., Allirand, J.-M., Pinet, A., de Reffye, P., Cournède, P.-H., & Ney, B. (2011). Characterization of the interactions between architecture and source-sink relationships in winter oilseed rape (*Brassica napus*) using the GreenLab model. *Annals of Botany*, *107*(5), 765–79. <http://doi.org/10.1093/aob/mcq205>
- Jullien, A., Mathieu, A., Fortineau, sA. 2015. Branching regulation by red to far-red ratio in *Brassica napus*. *International Rapeseed Congress, 5-9 July 2015, Saskatoon, Saskatchewan, Canada*
- Moeller, C., Evers, J. B., & Rebetzke, G. (2014). Canopy architectural and physiological characterization of near-isogenic wheat lines differing in the tiller inhibition gene tin. *Frontiers in Plant Science*, *5*(December), 1–14. <http://doi.org/10.3389/fpls.2014.00617>
- Ouzounis, T., & Alle, H. (2015). Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism : A Review. *HortScience*, *50*(June), 1128–1135.
- Rondanini, D. P., Vilariño, M. D. P., Roberts, M. E., Polosa, M. a., & Botto, J. F. (2014). Physiological responses of spring rapeseed (*Brassica napus*) to red/far-red ratios and irradiance during pre- and post-flowering stages. *Physiologia Plantarum*, *152*, 784–794. <http://doi.org/10.1111/ppl.12227>
- Roy, E. (2012). Qua2Ray : Logiciel d'analyse du rayonnement lumineux. Journées de la Mesure et de la métrologie, 8-11 Octobre 2012, Le Croisic
- Simon, J. (2016). Comment modifier la quantité et la qualité de la lumière au sein des couverts denses pour étudier leurs effets respectifs et combinés sur la ramification chez le colza (*Brassica napus* L.) ? Rapport d'étude bibliographique de M1 AETPF, 27 p.. AgroParisTech.
- Teulière, E. (2015). Caractérisation et modélisation de l'environnement spectral dans des couverts de Colza d'architecture différente. Étude du lien avec la ramification. Rapport de stage de Licence 3. Ecole Normale Supérieure Ulm.

ANNEXES

Annexe 1 :

Les 20 bacs sont sous un grand filet pour empêcher les oiseaux ou autres gros ravageurs de rentrer sur le dispositif. L'avantage d'une expérience en bacs est la possibilité de produire des environnements contrastés sur une petite surface tout en reproduisant les conditions de peuplement. Un autre avantage est que les bacs sont surélevés par rapport au niveau du sol, ainsi les mesures non destructives comme par exemple relever le nombre de feuilles à différentes dates sont facilités. Enfin cette expérience a nécessité l'installation d'un système électrique afin d'alimenter les diodes électroluminescentes de manière constante.

Annexe 2 :

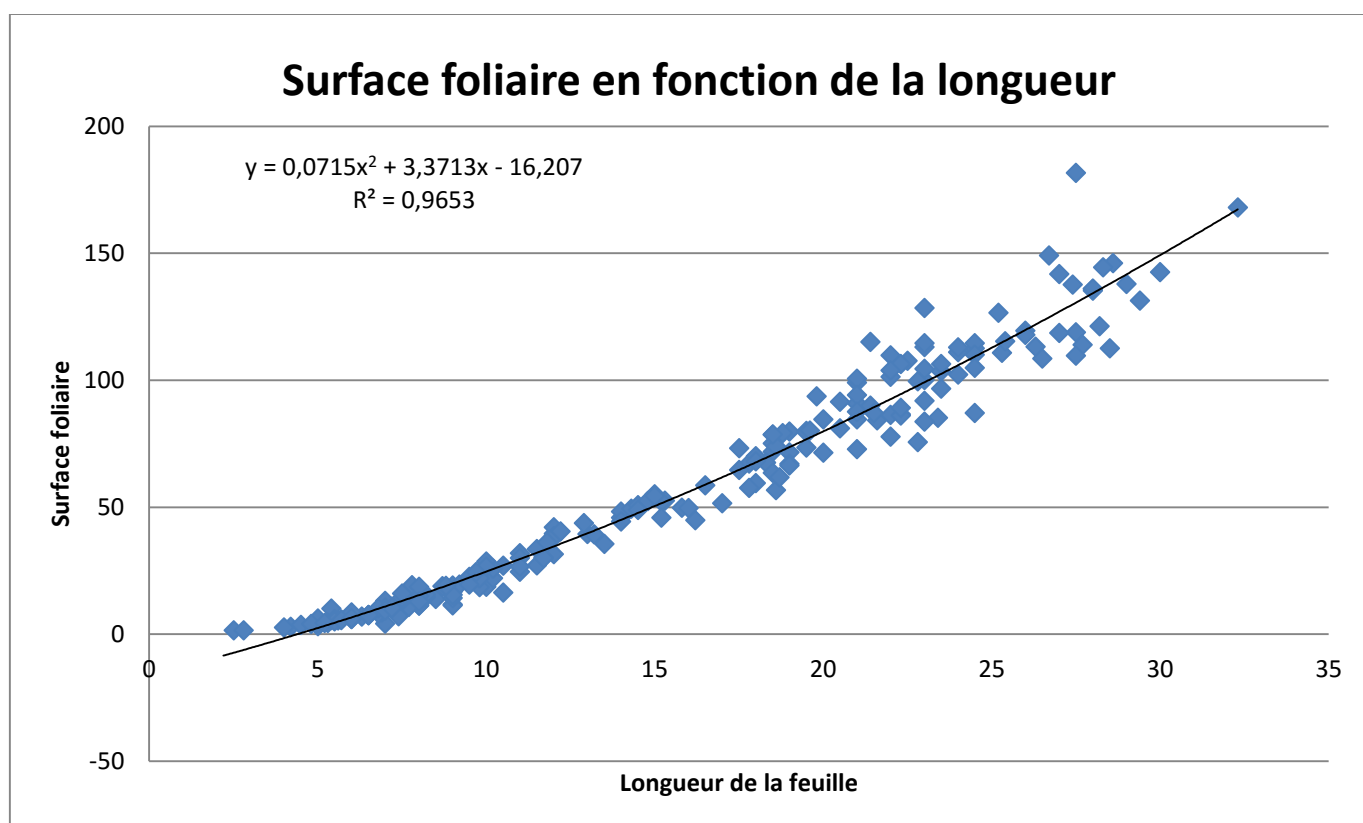


Figure 1 : La longueur des feuilles en fonction de la surface foliaire afin d'établir une relation calibrée et ainsi pouvoir estimer la surface foliaire avec uniquement la longueur des feuilles.

Annexe 3 :

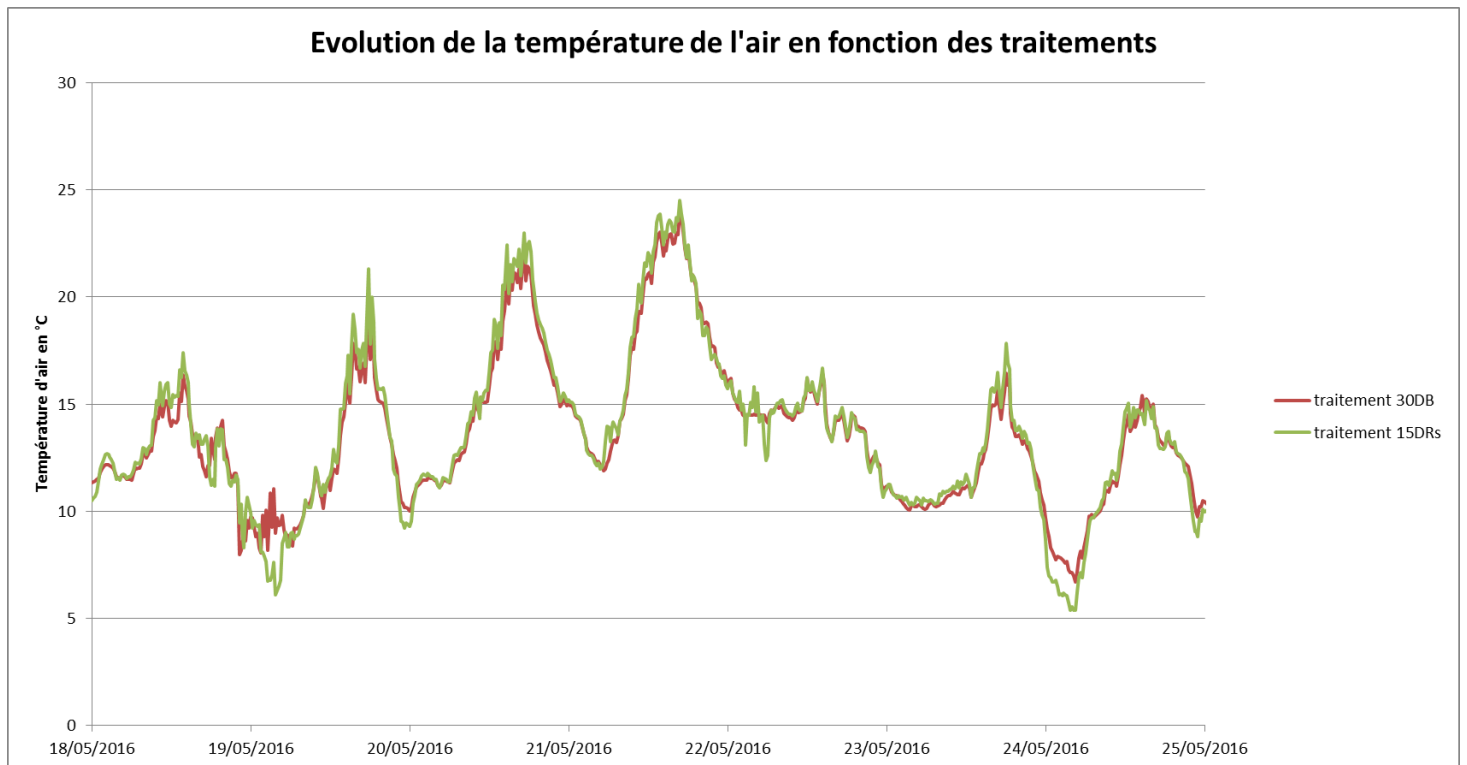


Figure 2 : Comparaison de l'évolution de la température de l'air des traitements forte densité LED blanches et faible densité LED Rs sur une courte période de temps afin de démontrer que les LED n'ont pas d'influence sur la température.

La figure 2 représente la température de l'air en fonction du temps pour les traitements forte densité LED blanches et faible densité LED Rs. Il s'agissait de regarder si ces évolutions étaient semblables ou non, afin de mettre en évidence une possible modification de la température par les LED. Sur ce graphique nous observons que les températures suivent la même évolution, ce qui montre bien que les LED, qui sont de nature différente dans les deux traitements, n'ont pas d'impact sur la température.

Annexe 4 :

Surfaces foliaires des plantes selon les traitements le 09/06/2016 (551,1 °C.j)

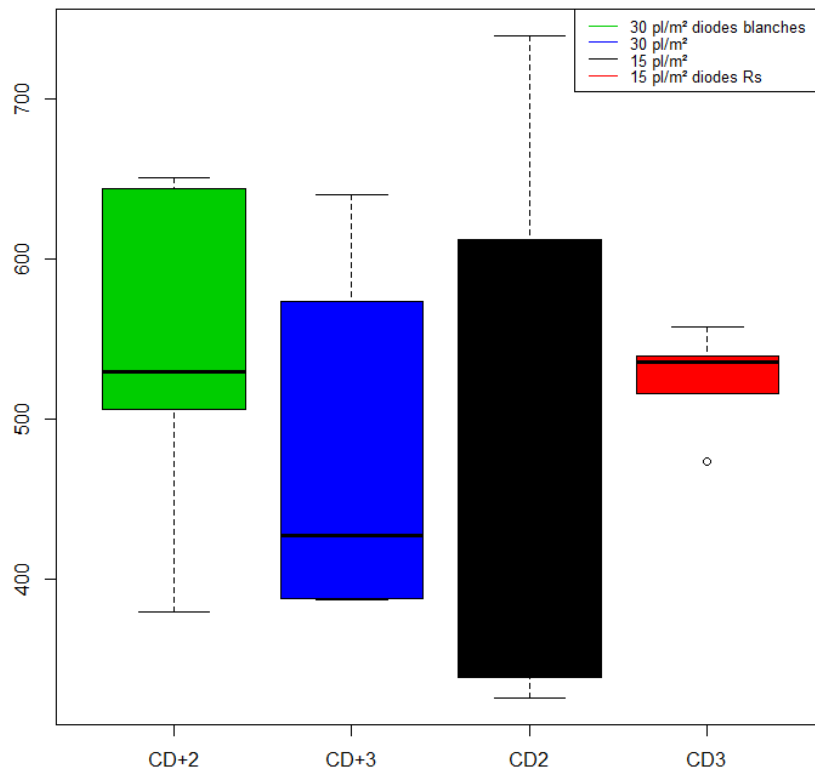
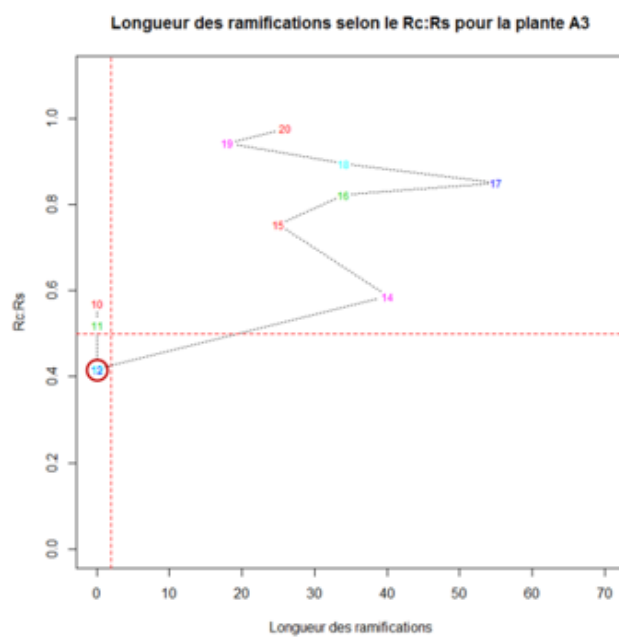
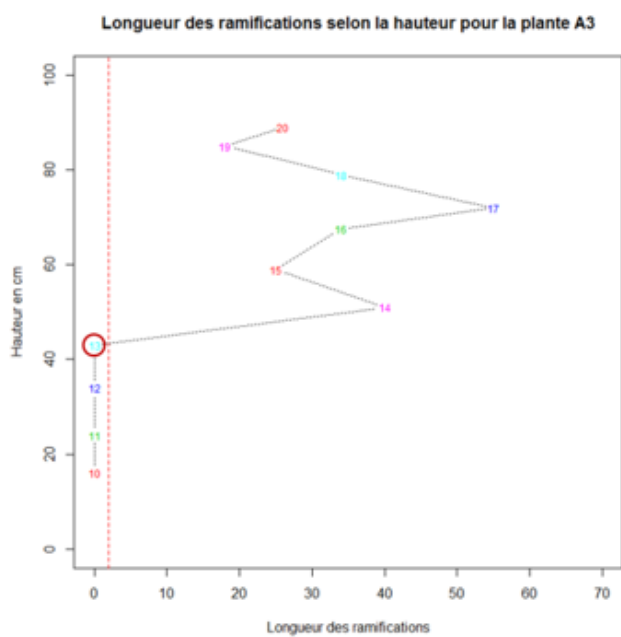
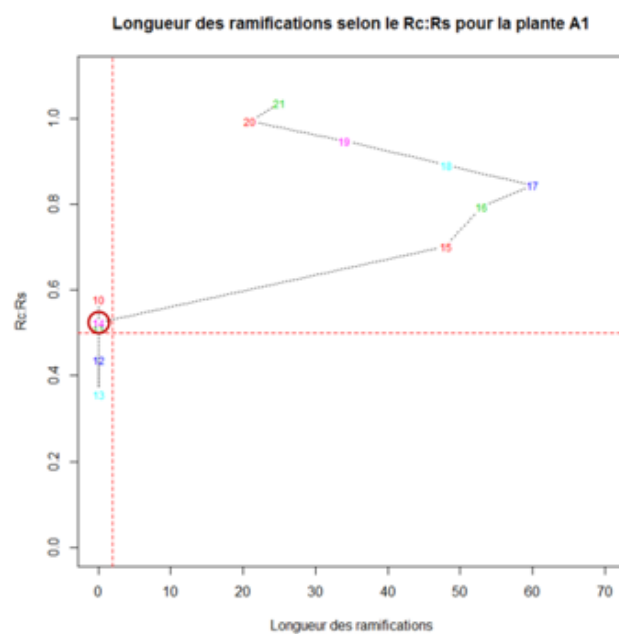
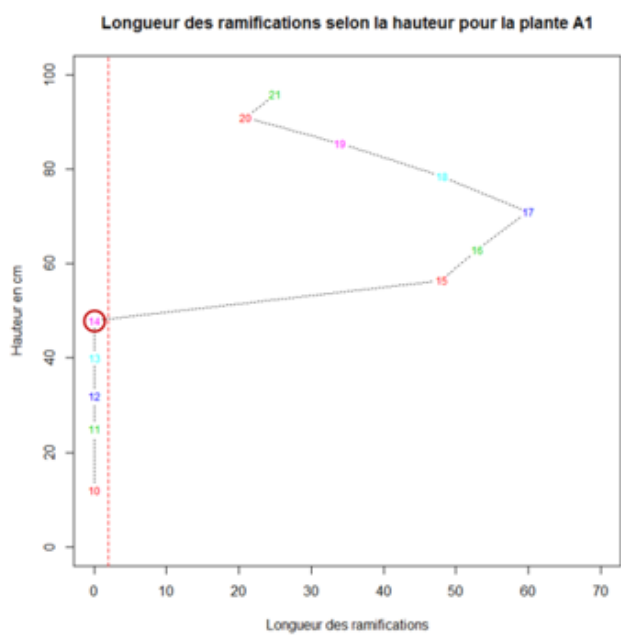
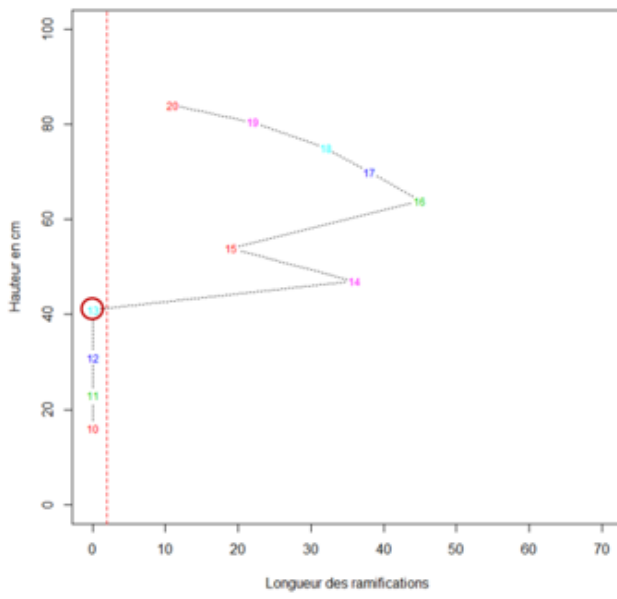


Figure 3 : Boîtes à moustaches représentant les estimations de surfaces foliaires selon les traitements le 9 juin.

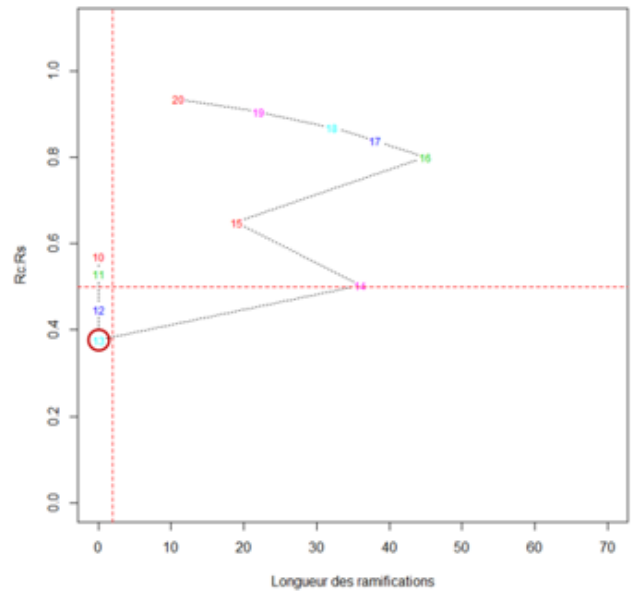
Annexe 5 :



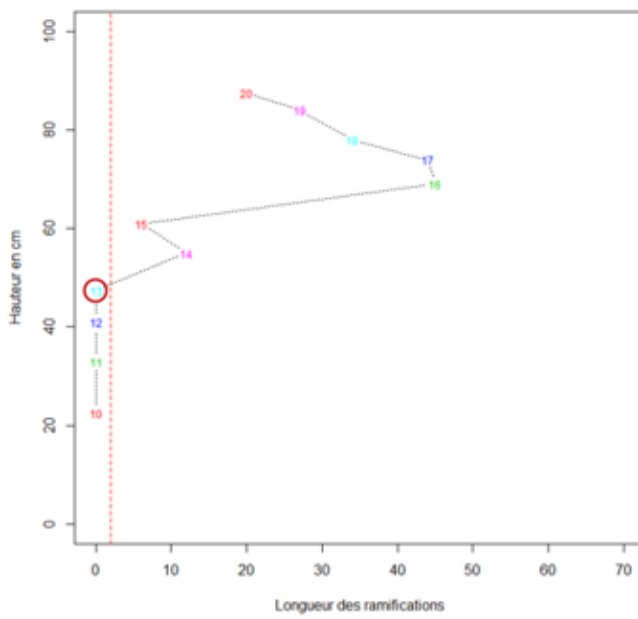
Longueur des ramifications selon la hauteur pour la plante A5



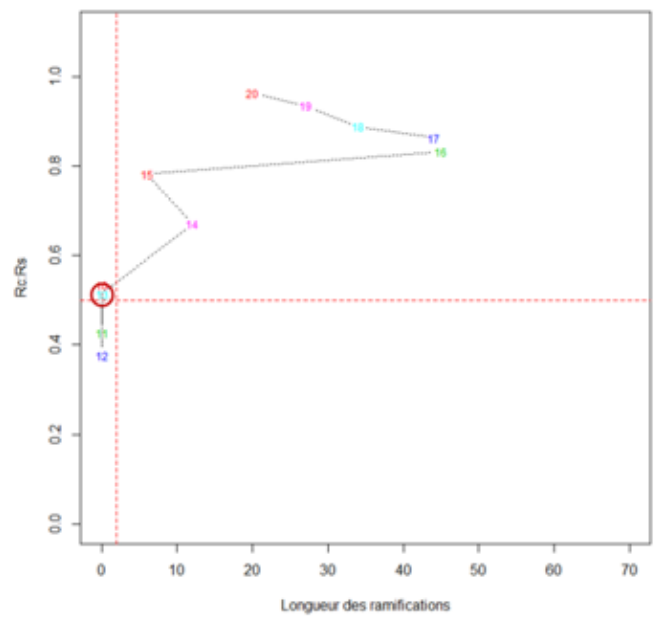
Longueur des ramifications selon le Rc:Rs pour la plante A5



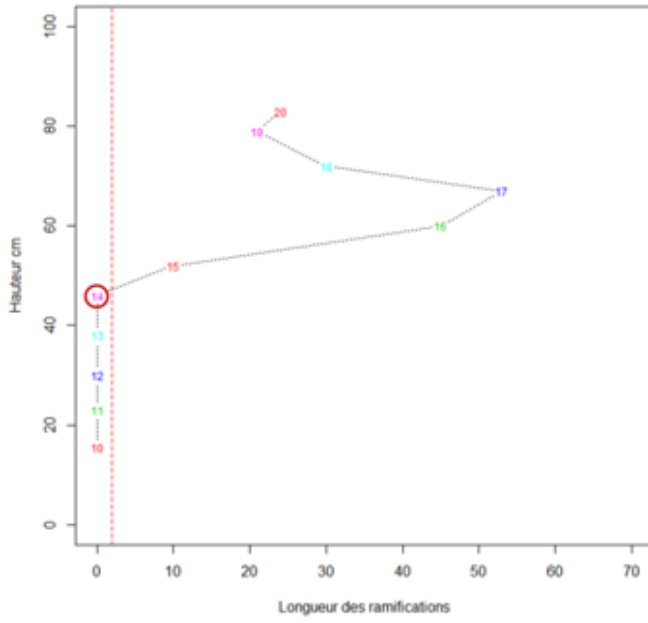
Longueur des ramifications selon la hauteur pour la plante B2



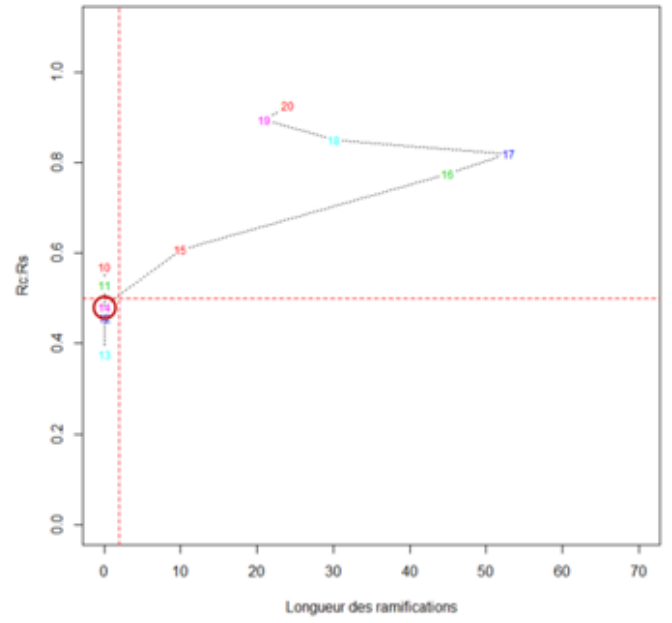
Longueur des ramifications selon le Rc:Rs pour la plante B2



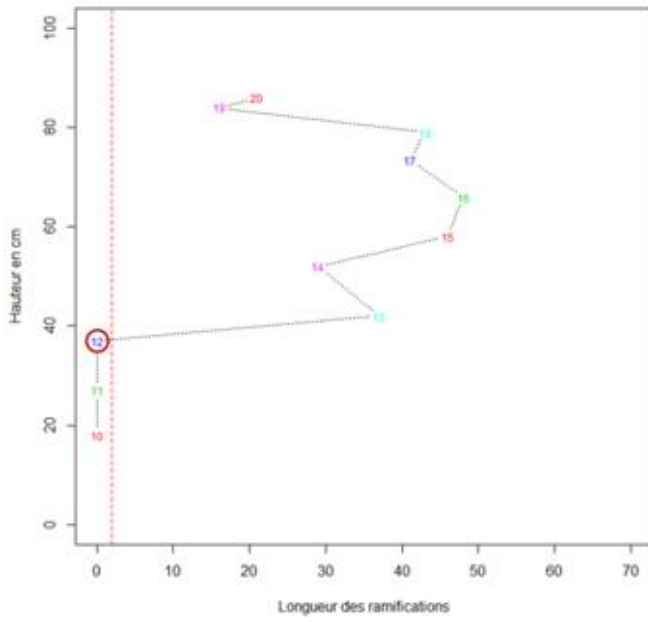
Longueur des ramifications selon la hauteur pour la plante B4



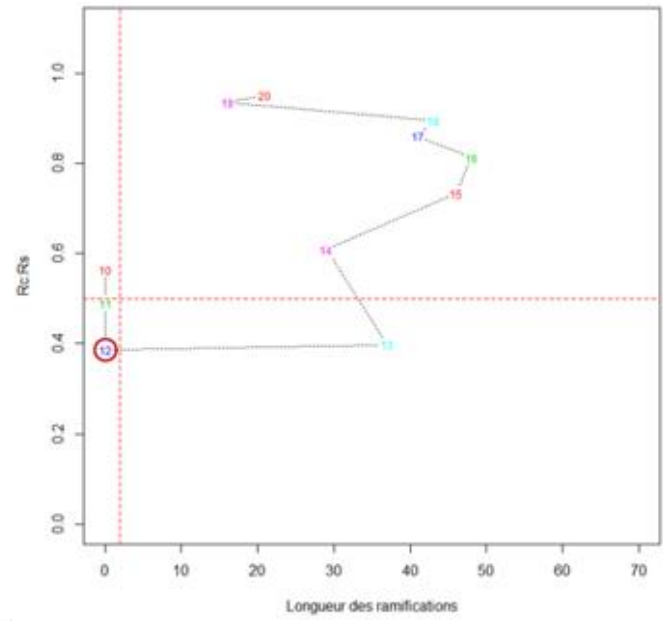
Longueur des ramifications selon le Rc:Rs pour la plante B4



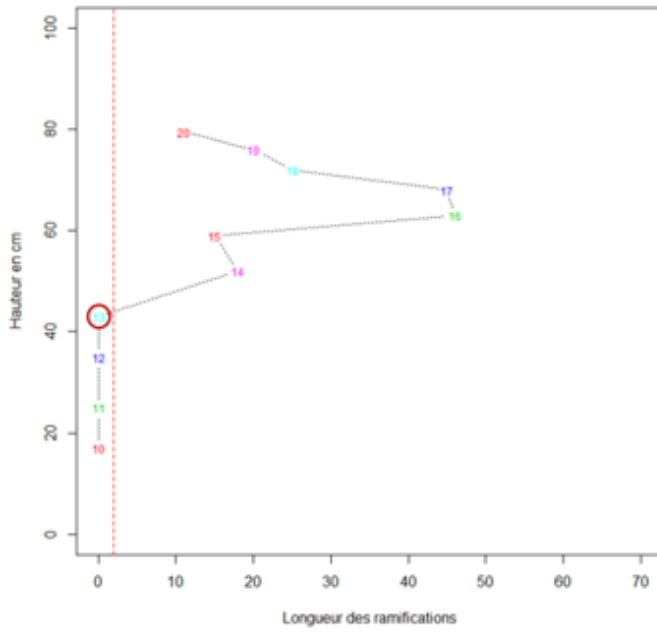
Longueur des ramifications selon la hauteur pour la plante B6



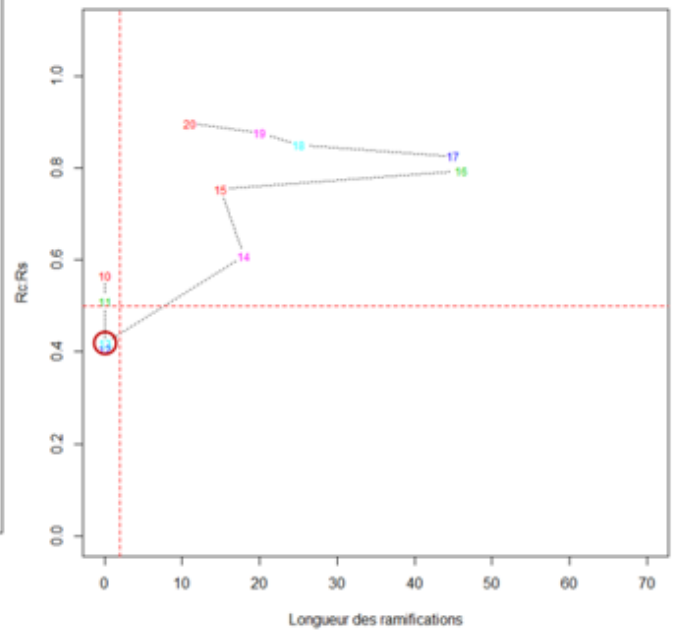
Longueur des ramifications selon le Rc:Rs pour la plante B6



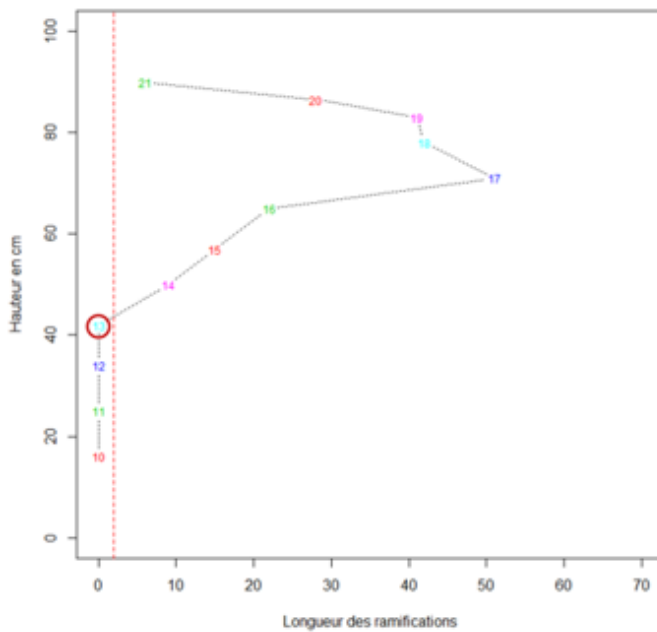
Longueur des ramifications selon la hauteur pour la plante C1



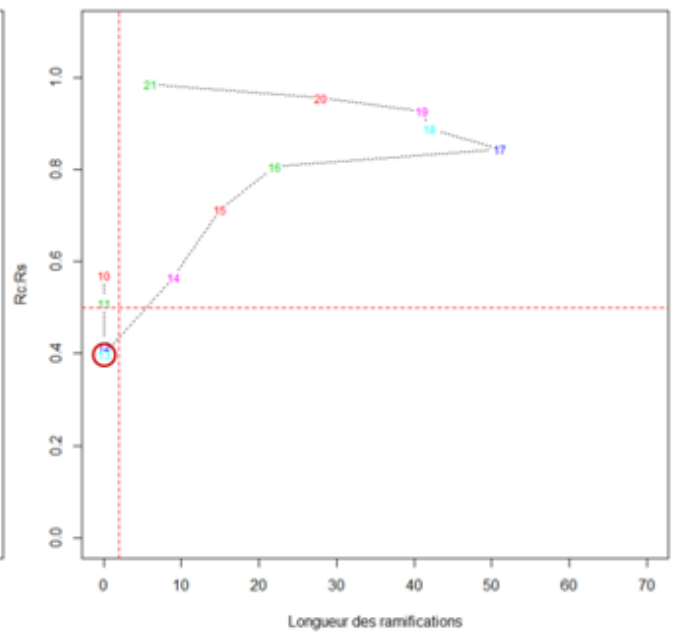
Longueur des ramifications selon le Rc:Rs pour la plante C1



Longueur des ramifications selon la hauteur pour la plante C3



Longueur des ramifications selon le Rc:Rs pour la plante C3



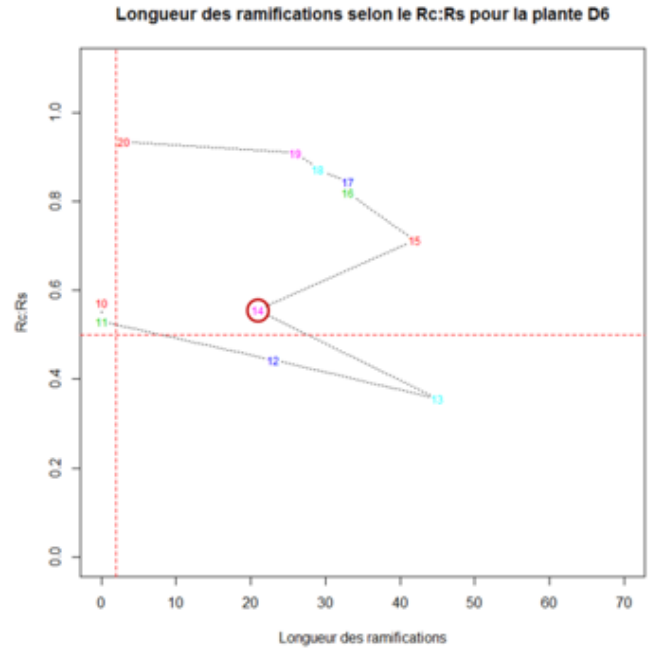
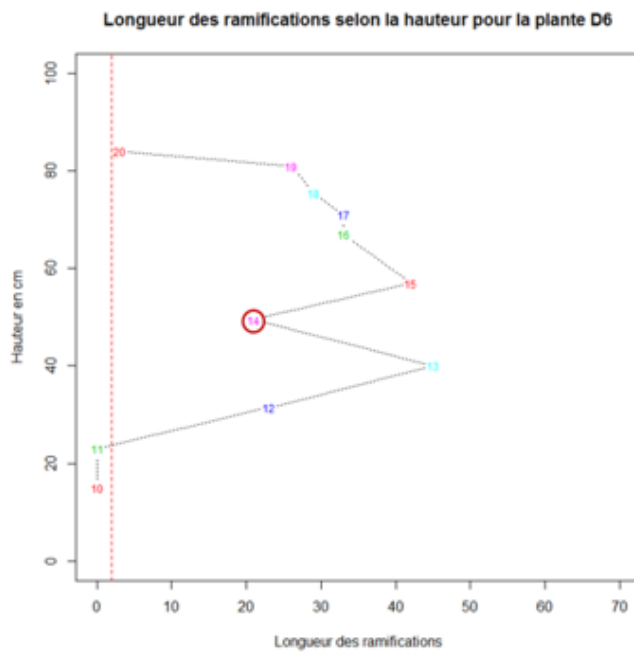
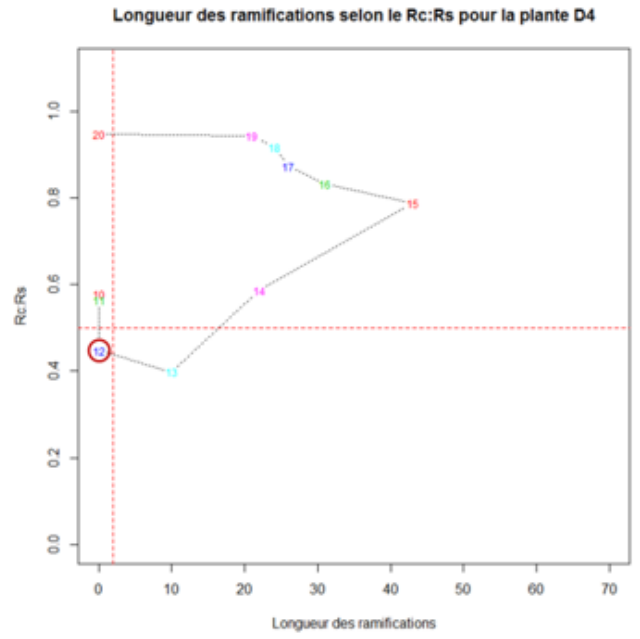
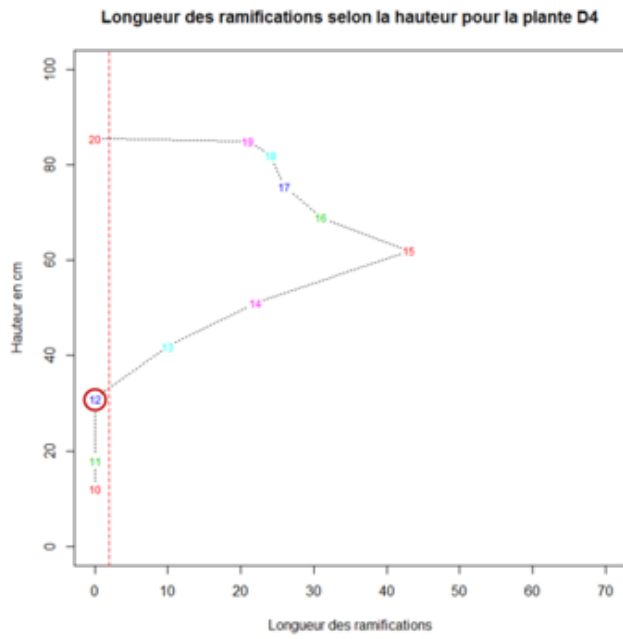


Figure 4 : Longueur des ramifications selon la hauteur et selon le Rc:Rs, avec la précision du numéro de l'entrenœud, pour les plantes A1, A3, A5, B2, B4, B6, C1, C3, D4 et D6 du traitement 15 pl/m² avec LED Rs. Le cercle rouge désigne l'entrenœud visé par le dispositif LED Rs.

Annexe 6 :

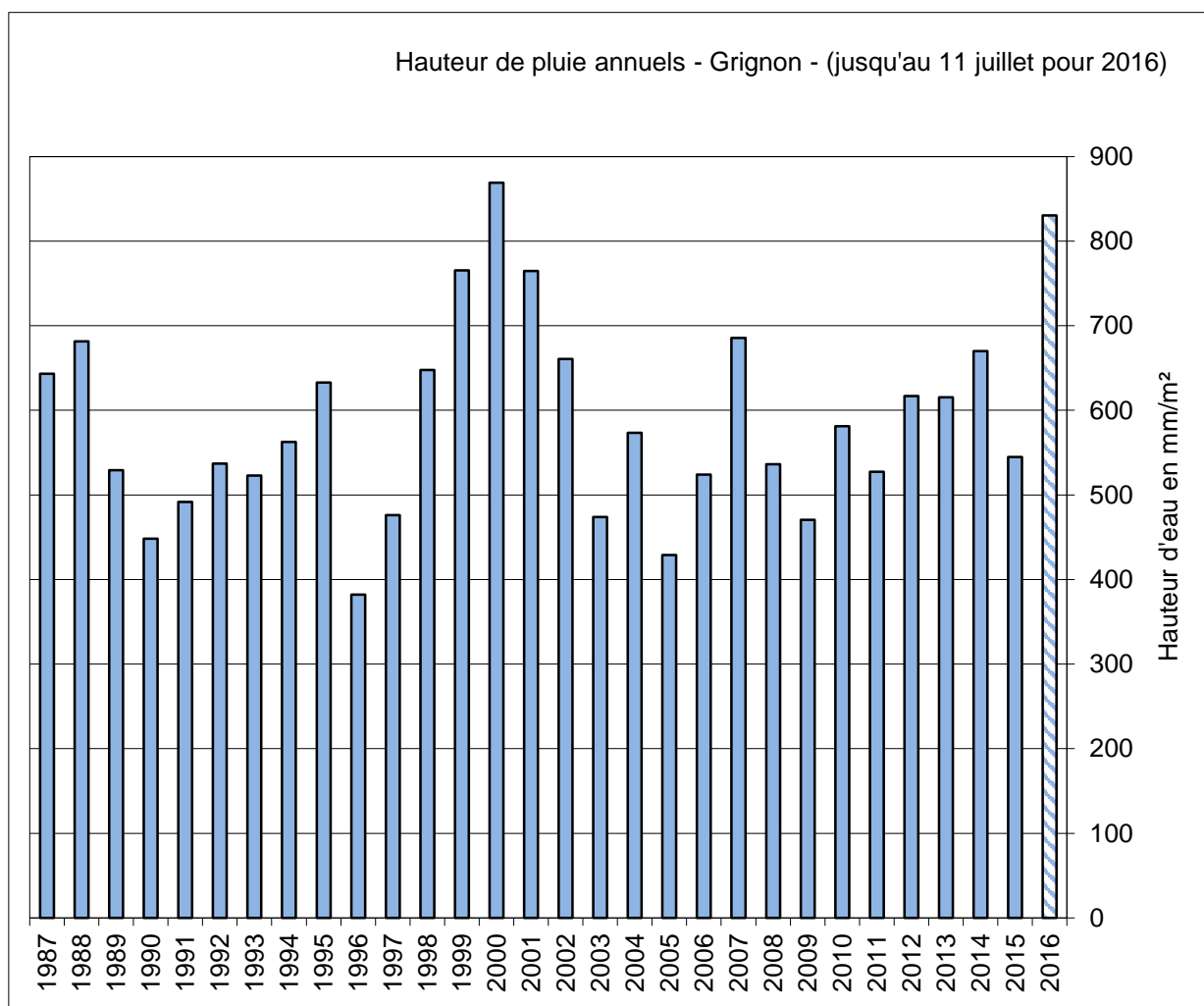


Figure 6 : Hauteur de pluie par année à Grignon. La valeur pour 2016 ne va que jusqu'au 11 juillet et est déjà proche du maximum annuel atteint en 2000.