

MÉMOIRE

Présenté par : **OHEIX Phénicia**

Dans le cadre de la dominante d'approfondissement :
IEVU (Ingénierie des espaces végétalisés urbains)

**Etude de la productivité et de la qualité de fraisiers et salades selon leurs positions (hauteurs et orientations) en colonnes aéroponiques ;
Mise en lien des résultats avec le profil d'ensoleillement des colonnes**

Pour l'obtention du :
DIPLÔME D'INGÉNIEUR AGRONOME DE UNILASALLE BEAUVAIS



Stage effectué du 02/03/2020 au 01/09/2020

À : AGRIPOLIS ORGANICS, 66 Rue de la Glacière, 75013 PARIS

Rapport confidentiel ☒

Date d'expiration de confidentialité : 01/09/2023

Enseignant référent : Patrick Stella, Maître de Conférences en bioclimatologie

Maître de stage : Antoine CUSSET, Responsable Agronome chez Agripolis

Engagement de non plagiat

① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

③ Sanction : En cas de manquement à ces consignes, le département SIAFEE se réserve le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

④ Engagement :

Je soussigné (e) Phénicia OHEIX
Reconnaît avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Paris le 18/09/2020

Signature :



Table des matières

I.	Introduction : Contexte et enjeux	7
II.	Matériel et Méthode	9
II.1	Le système de production : Colonnes aéroniques verticales.....	9
II.2	Mise en place du dispositif expérimental.....	12
II.2.1	Matériel biologique	12
II.2.2	Choix du placement des plants	14
II.2.3	Choix des traitements répartis sur la colonne.....	15
II.3	Protocoles de mesures	16
II.3.1	Mesure de l'intensité lumineuse sur les colonnes	16
II.3.2	Mesure de productivité et qualité des salades	16
II.3.3	Mesure de la qualité et la productivité des fraisiers	19
II.3.4	Traitement des données	20
III.	Résultats et discussion.....	21
III.1	Intensité lumineuse moyenne reçue par les plantes	21
III.1.1	Résultats d'intensité lumineuse reçue par les fraisiers.....	21
III.1.2	Résultats d'intensité lumineuse reçue par les salades « Gotham »	22
III.1.3	Résultats d'intensité lumineuse reçue par les salades « Rougette ».....	22
III.1.4	Interprétation et discussion des résultats d'intensité lumineuse.....	23
III.2	Rendement et qualité des fraises.....	25
III.2.1	Rendement moyen commercialisable par fraisier	25
III.2.2	Taux de sucre moyen des fruits.....	27
III.2.3	Taux d'acide moyen des fruits	29
III.2.4	Conclusion intermédiaire	30
III.3	Productivité et qualité des salades « Rougette » et « Gotham »	31
III.3.1	Rendement et volume des salades « Rougette » et « Gotham ».....	31
III.3.3	Pomaison des salades « Rougette » et « Gotham ».....	35
III.3.4	Elongation des salades « Rougette » et « Gotham »	37
III-3.5	Conclusion Intermédiaire.....	39
IV	Synthèse et amélioration de l'étude	41
V	Conclusion	43
	Bibliographie	44
	ANNEXES	47

Table des illustrations

Figure 1 : Vue générale du toit de la piscine Cour des Lions.....	9
Figure 2 : Schéma du site Cour des lions vue d'en haut.....	9
Figure 3 : Jeune pousse de salade dans une motte de coco.....	10
Figure 4 : Fraisier maintenue par une mousse dans un pot panier.....	10
Figure 5 : Colonne de culture.....	11
Figure 6 : Schéma global du fonctionnement du système développé par Agripolis.....	11
Figure 7: Fraisier "racines nues" avant repiquage.....	13
Figure 8 : Fraisier en pot panier maintenu par de la mousse.....	13
Figure 9 : Jeunes pousses de salades dans des mottes de fibre de coco.....	13
Figure 10 : Salade "Rougette" au moment de la récolte.....	13
Figure 11 : Salade "Gotham" au moment de la récolte.....	13
Figure 12: Schéma du placement des différentes plantes vue du dessus. Chaque point représentant une colonne aéroponique.....	14
Figure 13 : Photographie d'une colonne et schéma illustrant la méthode de division des colonnes.....	15
Figure 14: Méthode de mesure du volume de la salade.....	17
Figure 15 : Salade pommée et non pommée.....	18
Figure 16 : Niveaux d'élongation des salades.....	18
Figure 17 : Résultats d'intensité lumineuse moyenne reçue par les fraisiers selon leurs orientations et leurs sections.....	21
Figure 18 : Résultats d'intensité lumineuse moyenne reçue par les salades « Gotham » selon leurs orientations et leurs sections.....	22
Figure 19 : Résultats de l'intensité lumineuse moyenne reçu par les salades « Rougettes » selon leurs orientations et leurs sections.....	22
Figure 20 : Résultats de l'intensité lumineuse moyenne reçu par les salades et les fraises selon leurs orientations et leurs sections.....	24
Figure 21 : Rendement moyen commercialisable par fraisier selon leurs orientations et leurs sections.....	25
Figure 22 : Taux de sucre moyen des fraises selon la section.....	27
Figure 23 : Taux d'acide moyen des fraises selon la section.....	29

Figure 24 : Rendement moyen d'une salade « Gotham » et « Rougette » selon leurs orientations et leurs sections.....	31
Figure 25 : Volume moyen d'une salade « Gotham » et « Rougette » selon leurs orientations et leurs sections.....	32
Figure 26 : Pourcentage de salades pommées (variété « Rougette » et « Gotham ») selon leurs orientations et leurs sections.....	36
Tableau 1 : Calendrier de culture.....	13
Tableau 2 : Synthèse des résultats obtenus pour les colonnes de fraises selon la section, l'orientation et le traitement (section x orientation).....	30
Tableau 3 : Effectifs de salades pour chaque niveau d'élongation selon la section et l'orientation.....	38
Tableau 4 : Synthèse des résultats obtenus pour les colonnes de salades selon la section, l'orientation et le traitement (section x orientation).....	40
Tableau 5 : Synthèse des résultats de l'étude.....	42

Glossaire :

CSS : Composés Solides Solubles

R&D : Recherche et Développement

PAR : Rayonnement Photosynthétique Actif

PPFD : Densité de Flux de Photons Photosynthétiques

AU : Agriculture Urbaine

Remerciements

Je remercie chaleureusement toute l'équipe Agripolis pour son accueil et sa bonne humeur.

Je remercie tout particulièrement les stagiaires de l'équipe R&D, Théo Porquet et Coline Beyret qui par leur sympathie, leur motivation et leur sens de l'humour m'ont permis de travailler agréablement pendant ces 6 mois.

Je tiens également à remercier Antoine Cusset, mon maître de stage, pour son accompagnement et sa sympathie.

I. Introduction : Contexte et enjeux

L'agriculture urbaine (AU) se définit comme étant une agriculture localisée en milieu urbain ou péri-urbain dont les produits et les services sont à destination de la ville (M'Baye et Moustier, 1999). Depuis quelques années, un développement net de cette nouvelle agriculture est constaté dans de nombreux pays et notamment en France (Ba et Aubry, 2011 ; Daniel, 2013). Les formes d'agriculture urbaine sont diverses et assurent des fonctions variées, c'est la raison pour laquelle on ne parle pas d'une mais des agricultures urbaines (Ba et Aubry, 2011 ; Daniel, 2013 ; Fleury, 2005 ; Wegmuller et Duchemin, 2010). Il n'existe pas de classification unique des AU mais on peut mentionner la typologie du Cerema et Exp'AU réalisée dans le cadre du rapport "Agriculture urbaine dans les écoquartiers" qui définit 8 formes d'AU (espaces productifs interstitiels, jardins collectifs, micro-fermes urbaines, micro-fermes spécialisées, fermes péri-urbaines productives en pleine terre, apiculture, éco-pâturage, aquaponie, aviculture) (Cerema et Exp'AU, 2019). Parmi ces différentes formes d'AU, les micro-fermes urbaines spécialisées ont pour objectif de produire des denrées alimentaires afin de générer des revenus (Cerema et Exp'AU, 2019).

Les espaces dédiés à l'agriculture urbaine en cœur de ville sont souvent restreints (Ba et Aubry, 2011; Thomaier et al., 2014). Aussi, certaines entreprises d'AU à but productif élaborent des systèmes innovants, basés sur la verticalité afin d'optimiser au mieux l'espace, et donc la production. On peut notamment citer les entreprises de maraîchage urbain Agripolis (culture en colonne en extérieur), Sous les fraises (culture sur murs verticaux en extérieur) ou encore Tower Farm (culture en colonne en intérieur).

Agripolis est une structure d'agriculture urbaine basée à Paris qui installe, exploite et/ou loue à des tiers des fermes maraîchères hors-sol sur les toits. La production se fait notamment en colonnes aéroponiques verticales. L'aéroponie est une technique de culture hors-sol sans substrat où les racines sont suspendues et irriguées par aspersion d'une solution nutritive (Lakhiar et al., 2018). Ce système de culture sur colonne est développé par l'entreprise depuis 5 ans et a subi de multiples modifications depuis sa création. Ce système est récent et présente encore des imperfections à optimiser. De multiples études ont notamment mis en évidence des disparités de rendement et de qualité des plantes en système de culture vertical (Calvete et al., 2007 ; Liu et al., 2007 ; Touliatos et al., 2016 ; Velasco-López et al., 2020). Les plantes se comporteraient différemment sur une même colonne de culture. D'après Touliatos et al. (2016) et Velasco-López et al. (2020), cette hétérogénéité pourrait être imputée à la lumière. En effet, dû à sa verticalité, le système ne permettrait pas un ensoleillement homogène des plantes (Touliatos et al., 2016 ; Velasco-López et al., 2020). L'entreprise Agripolis a également observé ces différences

de qualité et de productivité sur une même colonne pour des cultures de fraisiers et de salades notamment.

Dans ce contexte, Agripolis a mené durant l'été 2020 un programme de Recherche et Développement (R&D) afin d'optimiser son système de production et d'élargir son offre en fruits et légumes.

Dans le cadre de ce programme, j'ai réalisé diverses missions de R&D dont une principale que j'ai choisi de présenter dans ce mémoire.

Ma mission principale au sein de l'entreprise Agripolis a été d'étudier la productivité et la qualité de fraisiers et salades selon leur hauteur et orientation sur une colonne aéroponique. Les résultats obtenus ont ensuite été mis en lien avec le profil d'ensoleillement de chaque colonne de culture.

J'ai donc assuré l'élaboration et la mise en place des protocoles expérimentaux et j'ai également procédé à l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

L'enjeu de cette mission R&D pour l'entreprise était d'étudier l'hétérogénéité des conditions d'ensoleillement à l'échelle de la colonne et également d'observer les différences de productivité et de qualité des plantes sur une même colonne de culture. Les résultats de cette étude pourraient par la suite permettre à l'entreprise d'optimiser au mieux le placement des différentes plantes sur la colonne afin d'obtenir une qualité et une productivité optimale.

II. Matériel et Méthode

II.1 Le système de production : Colonnes aéroponiques verticales

L'espace de R&D Agripolis est situé sur le toit du centre sportif de la Cour des lions (9 rue Alphonse Baudin, 75011, Paris) (Figure 1). Ce site de 800 m² est un espace de production dont une partie a été isolée pour la R&D (Figure 2). De manière à assurer un environnement homogène et éviter un effet de bordure, l'espace de R&D est entouré par l'espace de production (Figure 2). Le dispositif expérimental est composé d'un îlot de 64 colonnes de culture (4 lignes de 16 colonnes) de 2m de haut pour 25,5cm de diamètre pouvant accueillir 52 plantes chacune. Sur une même ligne les colonnes sont espacées de 50 cm et l'espace entre chaque ligne est de 1m50 (Figure 2).



Figure 1 : Vue générale du toit de la piscine Cour des Lions (source : P.OHEIX)

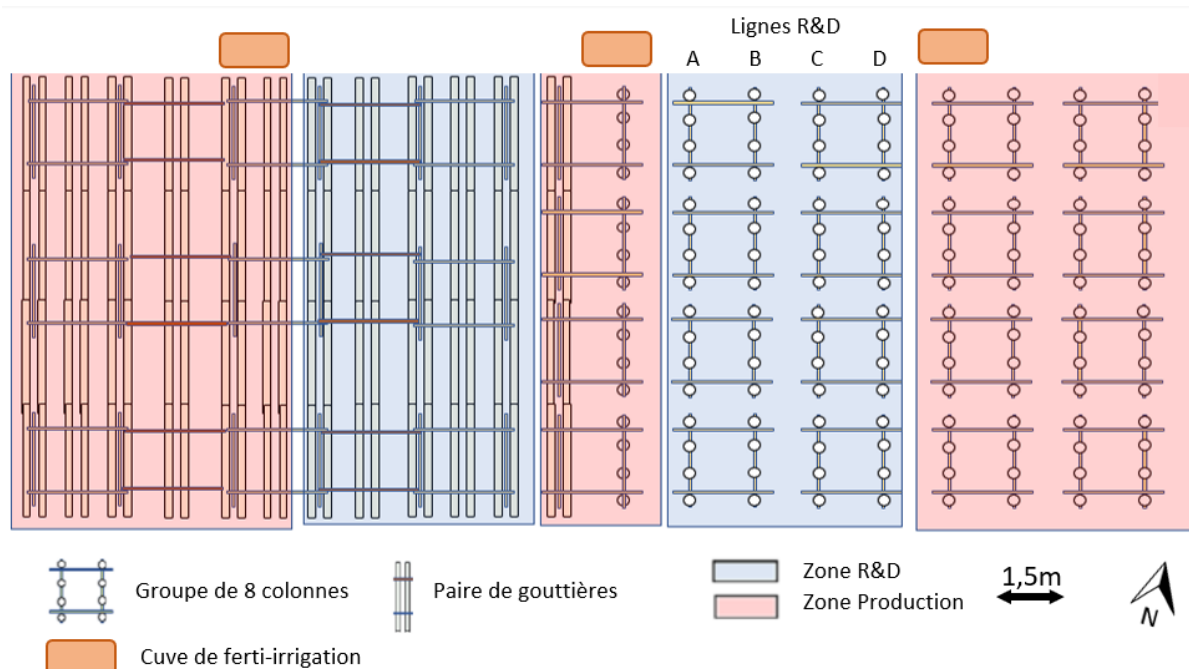


Figure 2 : Schéma du site Cour des lions vue d'en haut.

Chaque colonne est segmentée en 13 étages comportant chacun 4 alvéoles (Figure 5). Les alvéoles sont disposées en quinconce pour un meilleur développement des plantes (Figure 5). Un pot panier contenant de la mousse (pour les fraisières) ou une motte de coco (pour les autres plantes) constitue le support de culture des plantes (Figure 3, Figure 4). Les racines sont suspendues à l'intérieur de la colonne et sont régulièrement irriguées par aspersion via une buse située au sommet de la colonne (Figure 6). Cette méthode dite de « ferti-irrigation » permet à la fois d'irriguer et de fertiliser les plantes par l'apport d'une solution enrichie en nutriments.

Deux types de fertilisants sont utilisés : fertilisants organiques et minéraux. Le dosage des fertilisants dans la solution se fait automatiquement grâce à un appareil de contrôle du pH et de l'électro-conductivité (EC) (appareil Profilux4 GHL®) (Figure 6). La mesure de l'électro-conductivité (EC) permet de contrôler le dosage des nutriments. Le niveau d'EC est adapté selon le type de plante et selon leur stade de développement. Le pH est régulé par l'ajout d'acide phosphorique dans la solution et doit rester stable afin que l'absorption des nutriments soit optimale. Les cycles d'irrigation varient selon la période de la saison.

La solution est homogénéisée dans une cuve de 520L qui va assurer la ferti-irrigation d'un îlot de colonnes (soit 64 colonnes) (Figure 6). L'eau nutritive est acheminée vers les colonnes via une pompe et le surplus d'eau ruisselant sur les racines est récupéré pour être réinjecté dans le système (Figure 6).

En règle générale, les plantes d'un même îlot sont identiques afin que le cycle et le dosage de la ferti-irrigation soient adaptés à la plante. Dans notre cas, la zone R&D était concentrée sur un unique îlot de colonnes. La fertilisation a donc été programmée pour les fraises malgré la présence d'autres plantes sur l'îlot (des salades notamment). Cette fertilisation inadaptée a pu notamment accélérer le développement des salades, entraînant une montée en graine précoce (Cf. partie III.3.4).



Figure 3 : Jeune pousse de salade dans une motte de coco. (P. OHEIX)



Figure 4 : Fraisier maintenue par une mousse dans un pot panier. (P. OHEIX)



Figure 5 : Colonne de culture (P. OHEIX)

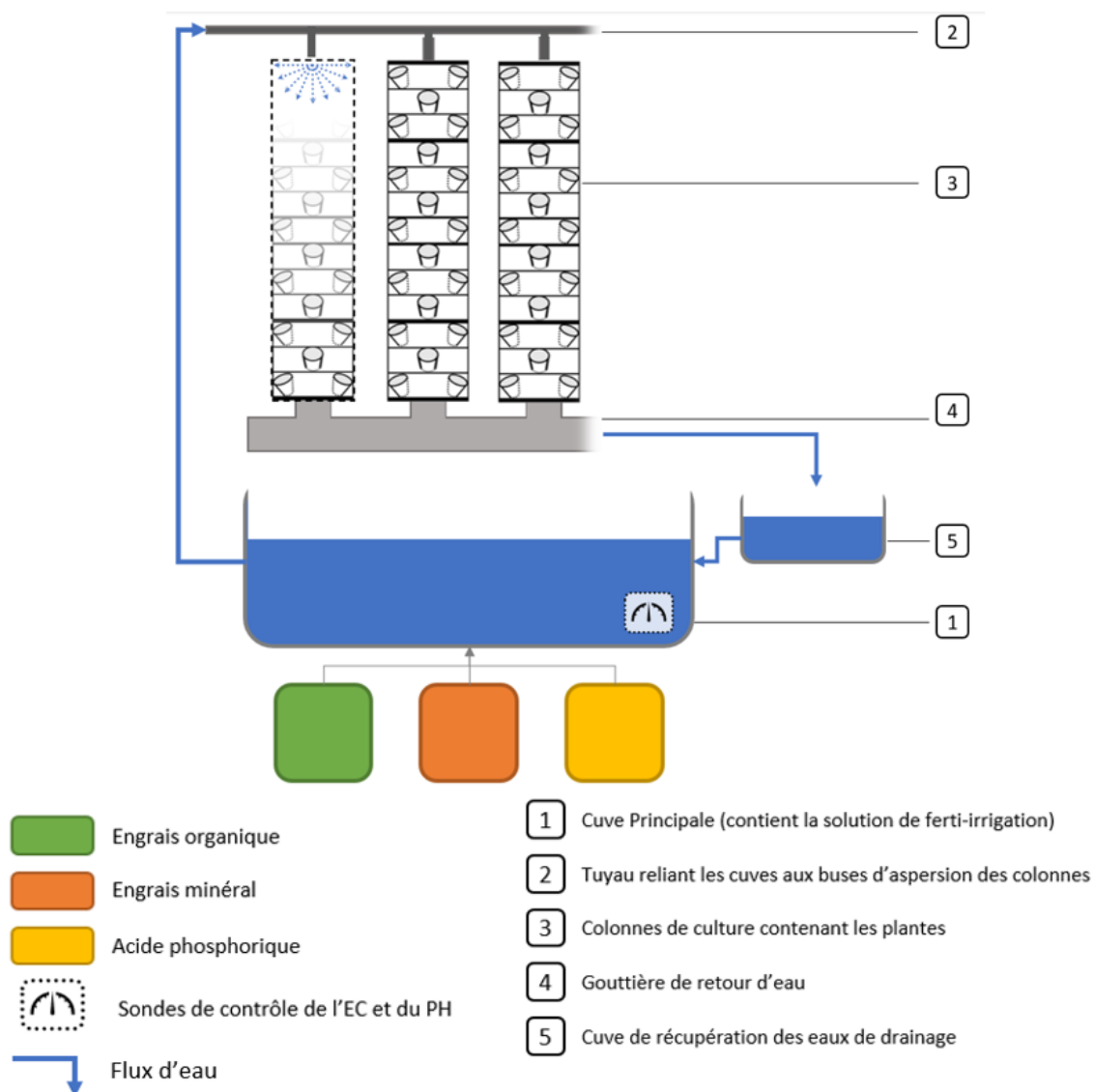


Figure 6 : Schéma global du fonctionnement du système développé par Agripolis.

Notons qu'après une attaque sévère de pigeons, l'ajout d'un filet anti-oiseaux autour de l'ilot a été nécessaire à partir du 25/05. Après avoir constaté un dessèchement des plantes mi-Avril, la fréquence des cycles d'irrigation a été augmentée afin de mieux correspondre aux besoins des plantes.

II.2 Mise en place du dispositif expérimental

II.2.1 Matériel biologique

La salade et la fraise faisant partie des productions principales de l'entreprise, l'expérimentation a été menée sur des plants de fraisiers de variété « Cijosée », des batavias de variété « Gotham », ainsi que des laitues romaines de variété « Rougette ». (Figures 8, Figure 10, Figure 11). L'enjeu ici n'est donc pas de comparer les performances des deux variétés mais seulement d'observer leur développement selon leur position sur la colonne. On étudiera donc l'impact de la hauteur et orientation sur les trois plantes séparément (fraisiers « Cijosée », salades « Gotham » et salades « Rougette »).

La fraise « Cijosée » est une variété remontante fournie par la compagnie de pépiniériste Angier S.A.S International. Les plants ont été livrés sous forme de « racines nues » et directement insérés dans les pots panier à l'aide de mousse (Figure 7, Figure 8). Le repiquage des 104 fraisiers s'est fait en semaine 13 sur deux colonnes (52 plants chacune) (Tableau 1). Le choix du nombre de colonnes de fraisiers a été défini en accord avec mon maître de stage afin que le temps d'entretien, de récolte et d'analyse des fraisiers soit raisonnable. Notons qu'au début de la saison, les fraisiers étaient maintenus par de la toile de jute qui s'est rapidement dégradée dans le système. Un remplacement de la toile par de la mousse a donc été nécessaire en semaine 27 (Tableau 1). Un premier pic de récolte a eu lieu de la semaine 20 à 22 et un second de la semaine 26 à 30. En début de saison, les fraisiers étaient carencés et asséchés en raison d'un mauvais dosage de l'acide dans la solution et d'un cycle d'irrigation inadapté. Ces éléments ont été rectifiés par la suite mais la première récolte a été fortement impactée. Les fruits étant très asséchés et peu nombreux, je présenterai dans ce rapport uniquement les résultats du deuxième pic de récolte.

Les semences des deux variétés de salades ont été fournies par l'entreprise AGROSEMENS. Les salades sont des plantes à cycle court (12 semaines entre semé et récolte), ainsi, deux cycles de salades ont été menés sur toute la durée du stage. Comme pour les fraisiers, 104 salades de chaque variété ont été repiquées (soit 2 colonnes par variétés), me permettant d'avoir un emploi du temps raisonnable.

L'étape de germination a été effectuée dans les serres de l'association « Pépin production » (75011, Paris). Le premier semis a été fait en semaine 7 pour un repiquage en semaine 13 et une récolte en semaines 19 et 20 (Tableau 1). Le second semis a été effectué en

semaine 17 pour un repiquage en semaine 21 et une récolte en semaines 28 et 29 (Tableau 1).

Les graines sont semées dans les mottes de coco et germent en pépinières avec une fertilisation selon leur stade de développement (Figure 9). Les plantules sont ensuite transférées dans les colonnes au bout de 4 semaines.

La première récolte de salades a été compromise à cause d’une attaque sévère de pigeons ayant détruit la majorité des salades. Un filet a été posé par la suite, permettant l’exploitation des résultats de la deuxième récolte de salades dans ce rapport.

Tableau 1 : Calendrier de culture (R= Récolte ; S=Semi , Repiq. = Repiquage)

	Février			Mars				Avril					Mai				Juin				Juillet				Août				
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Fraises							Repiq.						R1	R1	R1				R2	R2		R2	R2	R2	R2				
Salades "Gotham"	S1						Repiq.1				S2		R1	R1	Repiq.2							R2	R2						
Salades "Rougette"	S1						Repiq.1				S2		R1	R1	Repiq.2							R2	R2						

Filet

Irrigation + Mousse



Figure 7 : Fraisier "racines nues" avant repiquage. (P. OHEIX)



Figure 8: Fraisier en pot panier maintenu avec de la mousse (P.OHEIX)



Figure 9 : Jeunes pousses de salades dans des mottes de fibre de coco. (P. OHEIX)



Figure 10 : Salade "Rougette" au moment de la récolte. (P. OHEIX)



Figure 11 : Salade "Gotham" au moment de la récolte. (P. OHEIX)

II.2.2 Choix du placement des plants

L'ilot de colonnes R&D comprend 64 colonnes. L'enjeu de notre étude portant sur l'intensité lumineuse, le choix des colonnes dédiées à l'expérimentation s'est fait selon l'ensoleillement des colonnes. Le site Cour des lions est entouré d'immeubles et d'un parapet de 4m de haut comprenant une quinzaine d'ouvertures rectangulaires (Vue 3D en ANNEXE 7).

Grâce à une modélisation 3D du site sur le logiciel SketchUp fournie par Agripolis, j'ai pu simuler les ombres portées des immeubles et du parapet sur le toit (ANNEXE 7). Le logiciel a permis de simuler la course du soleil sur le site heure par heure sur toute la période de culture (de fin Mars à fin août) (ANNEXE 7). J'ai choisi une zone d'ensoleillement homogène pour toutes les plantes afin d'éviter un ensoleillement inégal des colonnes destinées à cette expérimentation (Figure 12). Les colonnes sont donc regroupées au Nord afin de limiter l'impact de l'ombrage des immeubles et du parapet de Avril à Mai (Figure 12). Passé cette période, l'ensoleillement était homogène sur le site. Les colonnes choisies sont entourées d'autres colonnes également cultivées afin d'éviter un effet de bordure (Figure 12). Ayant d'autres expérimentations à mener en parallèle de celle-ci, les types de plantes identiques sont également regroupés (Figure 12).

L'entreprise nous a informé qu'une possible baisse de l'irrigation liée à une perte de pression pouvait se produire en bout de ligne de colonnes (colonnes situées au Sud). C'est la raison pour laquelle les plants ont été prioritairement placés au Nord (Figure 12).

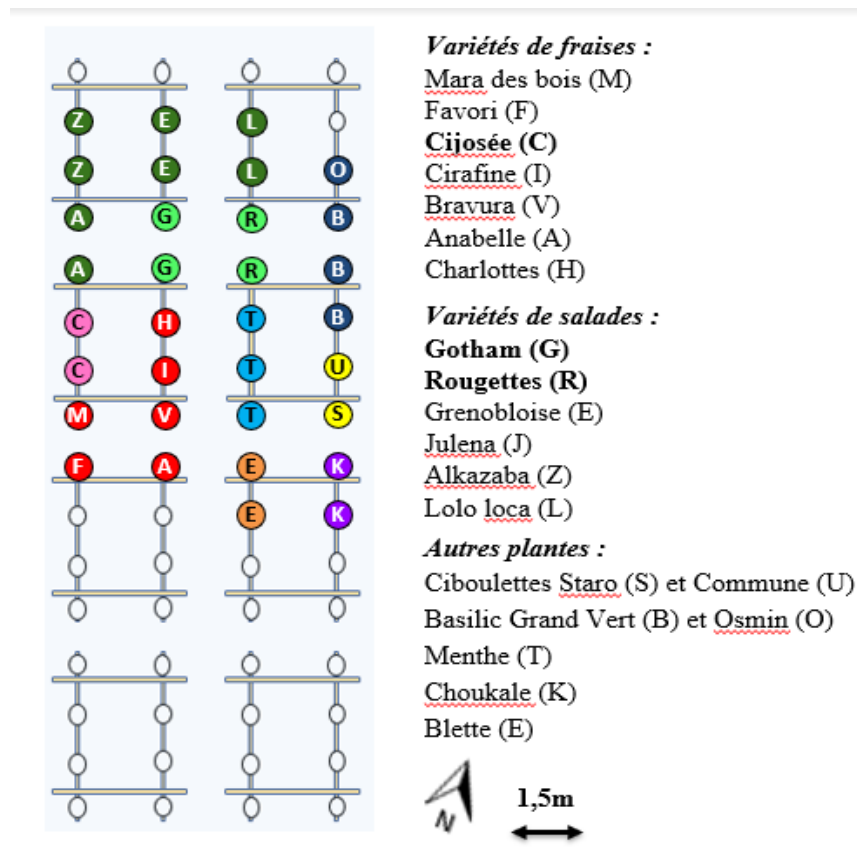


Figure 12 : Schéma du placement des différentes plantes vue du dessus. Chaque point représentant une colonne aéroponique.

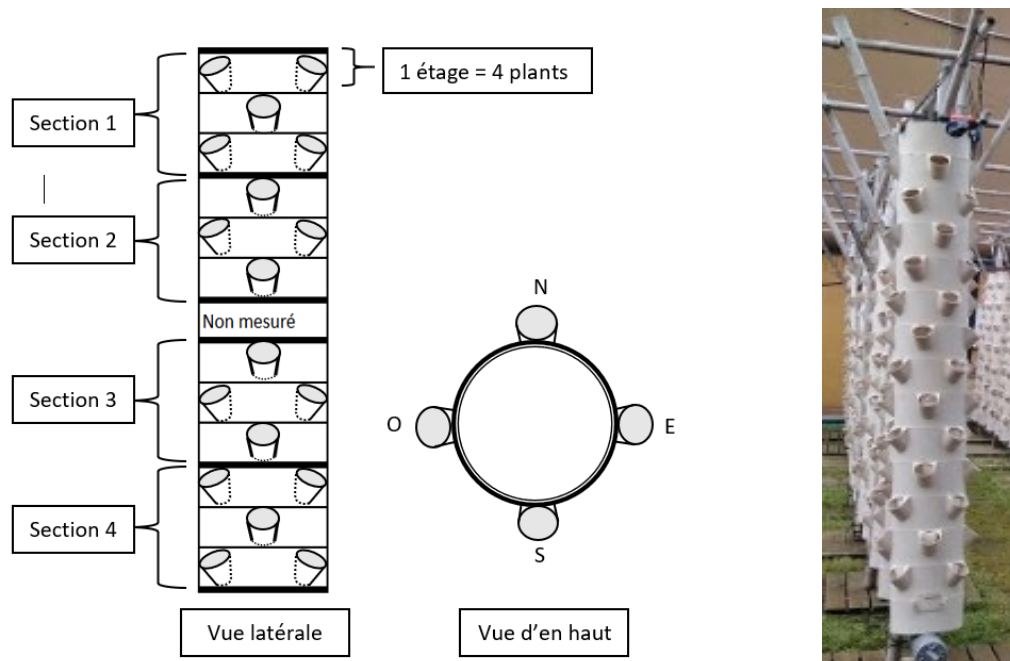
II.2.3 Choix des traitements répartis sur la colonne

Chaque plante étudiée comptait 104 plants répartis sur deux colonnes. Je disposais donc de 2 colonnes de fraises « Cijosée », deux colonnes de salades « Gotham » et deux colonnes de salades « Rougette ». L'enjeu de l'expérimentation étant d'étudier l'impact de deux facteurs croisés « section » et « orientation », les colonnes ont été divisées en 4 hauteurs (sections 1, 2, 3, 4) et 4 orientations (Nord, Sud, Est, Ouest) (Figure 13).

Les alvéoles étant en quinconce, leurs orientations ont été définies à l'aide d'une boussole en choisissant l'orientation la plus proche. Chaque colonne comprenant 13 étages de 4 plants. L'étage central n'a pas été pris en compte dans l'étude afin que chaque section ait le même nombre d'alvéole (Figure 13). Une section comprend donc 3 étages de plantes. En résumé, chaque colonne est divisée en 4 orientations (N, S, E, O) et 4 sections (1,2,3,4) soit 16 traitements (1N, 1S, 1E, 1O, 2N, 2S, 2E, 2O, 3N, 3S, 3E, 3O, 4N, 4S, 4E, 4O).

Sachant que je disposais de 2 colonnes par plante, chaque section comprend 24 plants (12x2 plants) et chaque orientation 24 plants également (12x2plants) (Figure 13). Ainsi, chaque traitement (section x orientation) compte 6 plants (3x2 plants).

Les mesures ont donc été effectuées sur l'intégralité des plantes sauf celles situées sur l'étage central soit 96 échantillons pour chaque type de plante.



II.3 Protocoles de mesures

II.3.1 Mesure de l'intensité lumineuse sur les colonnes

II.3.1.1 Méthode de mesure

Afin d'étudier l'ensoleillement des colonnes, j'ai effectué des relevés d'intensité lumineuse réguliers sur les colonnes. Les mesures d'intensité lumineuse ont été réalisées à l'aide d'un luxmètre digital Manutan® sur chaque traitement (section x orientation) (Figure 13).

Pour chaque plante, les mesures ont été effectuées sur une colonne et non sur les deux afin de limiter le nombre de relevés. J'ai donc considéré pour chaque plante que les deux colonnes étaient homogènes.

De façon à obtenir une valeur moyenne de l'intensité lumineuse reçue par chaque traitement, les mesures ont été réalisées tous les 14 jours sur toute une journée. Un relevé était effectué toutes les 2h entre 9h et 17h sur une journée.

Les mesures d'intensité lumineuse étaient exprimées en Lux, unité d'intensité lumineuse par unité de surface. Les plantes utilisent principalement les longueurs d'onde de la lumière situées entre 400 et 700 nm (McCree, 1972). Ce domaine de radiation lumineuse est aussi appelé rayonnement photosynthétique actif (PAR) (McCree, 1972). Afin de définir l'intensité lumineuse utilisable par les plantes, les données ont été converties en Densité de Flux de Photons Photosynthétique (PPFD) (McCree, 1972 ; Thimijan, 1983). Le PPFD caractérise la quantité de photons situés dans la plage du PAR par unité de surface et de temps. Il est exprimé en micromoles de photons photosynthétiques par mètre carré par seconde ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (McCree, 1972 ; Thimijan, 1983).

Le PPFD étant utilisé dans de nombreuses études pour caractériser l'intensité lumineuse reçue par les plantes (McCree, 1972 ; Touliatos et al., 2016 ; Velasco-López et al., 2020), les résultats des mesures ont été exprimés en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

II.3.2 Mesure de productivité et qualité des salades

L'enjeu de ces mesures est d'étudier la productivité et la qualité des salades « Rougette » et « Gotham » afin de les mettre en lien avec l'ensoleillement des colonnes. Je me suis basée sur des variables susceptibles d'être impactées par la lumière. Le choix des mesures s'est fait sur des critères de commercialisation en accord avec les attentes de l'entreprise. Une évaluation du poids, du volume, de la pommaison et de l'élongation des salades a donc été réalisée.

II.3.2.1 Mesure de rendement moyen

Chacune des salades a été pesée sur les deux colonnes. La mesure a été réalisée à l'aide d'une balance précise au gramme. Afin d'éviter toute perte d'eau par évapotranspiration, les salades ont été pesées immédiatement après la récolte.

II.3.2.2 Evaluation du volume

Le volume de la salade a été assimilé à un cylindre (Figure 14). L'objectif était de simplifier la mesure tout en ayant une appréciation représentative du volume de la salade. Une mesure du diamètre (d) et de la hauteur (h) a donc été effectuée afin de calculer le volume de toutes les salades ($\text{Volume} = V = \pi/4 * d^2 * h$). La mesure du diamètre s'est faite entre les feuilles les plus éloignées et la hauteur entre le collet et la crête des feuilles (Figure 14).



Figure 14 : Méthode de mesure du volume de la salade
(h = hauteur, d = diamètre)

II.3.2.3 Evaluation de la pommaison

La pommaison désigne le processus de formation de pomme de la salade (Lee et al., 2019). L'évaluation de la pommaison s'est faite selon les critères d'une compagnie de grande distribution travaillant avec l'entreprise Agripolis qui définit une salade pommée si « au moins 50% de ses feuilles est regroupé au centre de la salade » (Carrefour ®) Ainsi, les salades ont été classées en deux catégories : « pommées » et « non pommées » (Figure 15).



Figure 15 : Salade pommée et non pommée (Variété « Gotham » à gauche et « Rougette » à droite)

II.3.2.4 Evaluation de l'élongation

Certaines salades peuvent présenter des signes d'allongement de la tige au niveau des entre-nœuds. Les salades présentant cette élongation de la tige ne peuvent pas être commercialisées en « salade entière » mais en salade effeuillée ce qui représente une perte économique pour l'entreprise. Cette évaluation est non seulement un critère de qualité pour Agripolis mais peut également traduire un manque de lumière. Quatre niveaux d'élongation ont donc été définis : 0 = pas d'élongation, 1 = collet bombé, 2 = tige apparente au niveau des entre-nœuds, 3 = plus d'1cm de tige apparente (Figure 16).



Figure 16 : Niveaux d'élongation des salades (0 = pas d'élongation, 1 = collet bombé, 2 = tige apparente au niveau des entre-nœuds, 3 = plus d'1cm de tige apparente)

II.3.3 Mesure de la qualité et la productivité des fraisiers

L'objectif de ces mesures est d'étudier la productivité et la qualité des fraisiers afin de les mettre en lien avec l'ensoleillement des colonnes. Je me suis basée sur des variables susceptibles d'être impactées par la lumière. Le choix des mesures effectuées s'est fait sur des critères de commercialisation en accord avec les attentes de l'entreprise. Une évaluation du rendement commercialisable, du taux de sucre et d'acide des fruits a donc été réalisée.

II.3.3.1 Mesure de rendement

A chaque récolte, les fruits de chaque plant ont été pesés à l'aide d'une balance précise au gramme. Les fruits ont été séparés en deux groupes : commercialisables et non commercialisables. Les critères de commercialisation ont été définis avec l'entreprise. Un fruit est non commercialisable s'il ne présente pas le bon calibre (diamètre inférieur à 18mm) ou s'il est abimé (pourriture, piqûre d'insecte).

II.3.3.2 Mesure de taux de sucre

Le taux de sucre des fraises a été mesuré en employant une méthode de réfractométrie (Garner et al., 2008 ; Nielsen et al., 2010). Elle permet d'évaluer le taux de Composés Solides Solubles dans l'eau en se basant sur la densité d'une solution (Nielsen et al., 2010). L'indice de réfraction (IR) est mesuré en faisant passer un rayon lumineux au travers de deux substances de densités différentes. Le rapport entre l'angle d'incidence et l'angle réfracté permet de calculer l'IR qui va correspondre à une certaine concentration de sucre d'une solution (Nielsen et al., 2010). La valeur est exprimée en degrés Brix qui est une mesure du taux de sucre en gramme pour 100g de jus de fruits que l'on peut donc apparenter à un pourcentage de sucre (Nielsen et al., 2010). Un réfractomètre portatif HHTEC® a donc été utilisé afin de déterminer le taux de sucre des fruits.

Des jus de fraises ont été réalisés en mixant les fraises d'un traitement (soit les fruits de 6 plants). Ainsi, une mesure de taux de sucre moyen a été réalisée sur chaque traitement (section x orientation) et ce trois fois sur la période de récolte.

II.3.3.3 Mesure de taux d'acidité

La mesure de l'acidité totale des fruits est basée sur le protocole établi par Nielsen et al. (2010). L'acidité totale caractérise les acides organiques présents dans le fruit (les acides citriques, maliques, lactiques, tartriques et acétiques étant les principaux) qui vont influencer sur la qualité gustative (Nielsen et al., 2010).

L'acidité totale est mesurée par titrage colorimétrique. Le jus des fraises auquel on ajoute une solution de Phénolphthaléine est titré à l'aide d'une solution de NaOH (Protocole de Nielsen et al., 2010 en ANNEXE 8).

Comme pour les fraises, l'acidité des fruits a été mesurée par traitement et ce trois fois sur la période de récolte. Les résultats sont exprimés en pourcentage d'acide dans le jus (mg/100ml).

II.3.4 Traitement des données

L'analyse dynamique des données a été réalisée via Excel. L'analyse statistique a été réalisée grâce au logiciel R-Studio.

Analyse des données quantitatives (Intensité lumineuse, rendement, volume, taux de sucre et d'acide) :

Pour tous les tests, le seuil de significativité a été fixé à $p\text{-value} \leq 0,05$.

Après avoir vérifié la normalité des résidus et l'homogénéité des variances via un test de Shapiro et de Bartlett, des tests paramétriques de comparaisons multiples de moyennes à deux facteurs (orientation et section) ont été réalisés en effectuant une ANOVA puis un test de Tukey HSD.

Si les conditions de normalité des résidus et d'homogénéité des variances n'ont pas été vérifiées, des tests non-paramétriques de comparaisons multiples de moyennes à deux facteurs (orientation et section) ont été effectués en utilisant les tests de Kruskal-Wallis puis de Dunn.

Analyse des données qualitatives (Pommaison et élongation) :

Un test d'indépendance du χ^2 a été réalisé afin d'évaluer si la répartition des effectifs de salades dans les catégories d'élongation et de pommaison était dépendante ou non des facteurs « orientation » et « section ». Le seuil de significativité a été fixé à $p\text{-value} \leq 0,05$.

Les scripts de sortie du logiciel R-studio sont en Annexe 1 (Salades « Gotham »), Annexe 2 (Salades « Rougette »), Annexe 3 (Fraises) et Annexe 5 (Intensité lumineuse).

Afin de mettre en perspective les critères de productivité et de qualité avec l'ensoleillement, un test de corrélation entre les mesures d'intensité lumineuse et les variables mesurées a été réalisé via le test de Spearman basé sur les rangs (Résultats des corrélations en ANNEXE 4).

III. Résultats et discussion

III.1 Intensité lumineuse moyenne reçue par les plantes

Nous rappelons que les résultats d'intensité lumineuse moyenne sont exprimés en micromoles de photon par mètre carré par seconde ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Cette unité traduit la densité de flux de photons photosynthétiques utiles à la photosynthèse de la plante. Il est nommé PPFD pour Photosynthetic Photon Flux Density (Densité du Flux de Photon Photosynthétique) (McCree, 1972).

III.1.1 Résultats d'intensité lumineuse reçue par les fraisiers

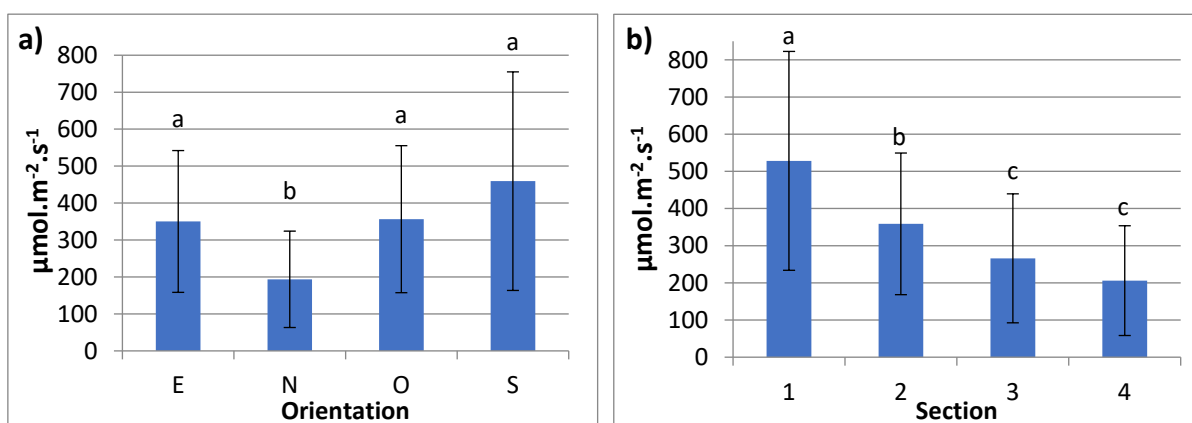


Figure 17 : Résultats d'intensité lumineuse moyenne reçue par les fraisiers selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Les valeurs d'intensité lumineuse sont exprimées en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Les lettres a, b, c indiquent les différences significatives selon le test Tukey de comparaison multiple de moyennes au seuil $p\text{-value} \leq 0.05$. La barre verticale représente l'écart-type.

Nous constatons que l'orientation Nord a reçu en moyenne une intensité lumineuse de $193,7 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ce qui est significativement moindre que les autres orientations (Figure 17a). Nous avons également mesuré une valeur moyenne d'intensité de $459,2 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour l'orientation Sud, $356,3 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour l'Ouest, $350,1 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour l'Est et aucune différence significative n'est avérée entre ces trois orientations (Figure 17a). On note une diminution de l'intensité lumineuse de 58% entre l'orientation Sud et l'orientation Nord.

D'après nos mesures, on observe une diminution d'ensoleillement avec la hauteur (Figure 17b). Ainsi, la section 1 ($528,2 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) et la section 2 ($358,7 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) ont reçu significativement plus de lumière que les sections 3 et 4 ($266 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et $205,9 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (Figure 17b). On note une diminution de l'intensité lumineuse de 62% entre la section 1 et la section 4.

III.1.2 Résultats d'intensité lumineuse reçue par les salades « Gotham »

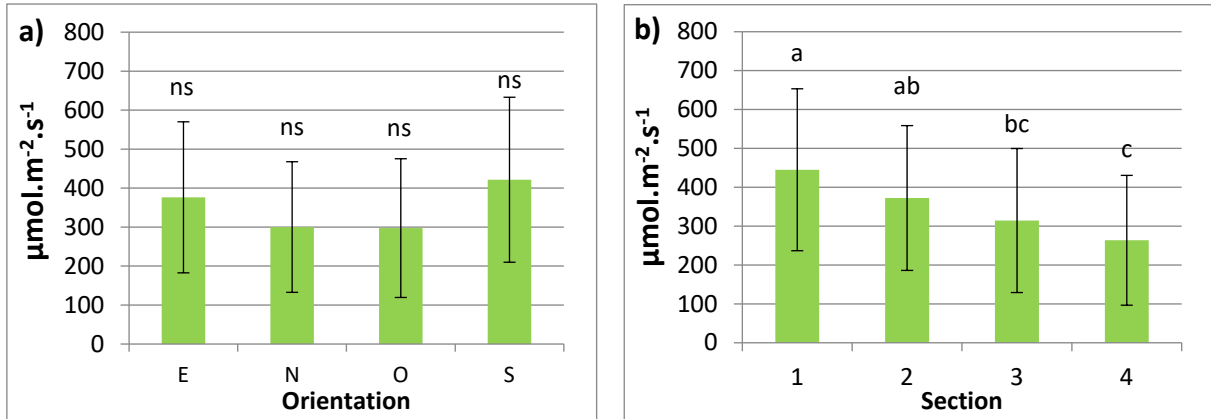


Figure 18 : Résultats d'intensité lumineuse moyenne reçue par les salades « Gotham » selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Les valeurs d'intensité lumineuse sont exprimées en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Les lettres a, b, c indiquent les différences significatives selon le test Tukey de comparaison multiple de moyennes au seuil $p\text{-value} \leq 0.05$. La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative. La barre verticale représente l'écart-type.

Les valeurs d'intensité lumineuse mesurées selon l'orientation oscillent entre 297,4 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et 421,5 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Figure 18a). Aucune différence significative n'est avérée selon l'orientation.

On observe une diminution de l'intensité lumineuse avec la hauteur (Figure 18b). La section 1 (445 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) a reçu en moyenne une intensité significativement plus importante que les sections 3 et 4 (314,4 et 263,6 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (Figure 18b). On note une diminution de l'intensité lumineuse de 41% entre la section 1 et la section 4.

III.1.3 Résultats d'intensité lumineuse reçue par les salades « Rougette »

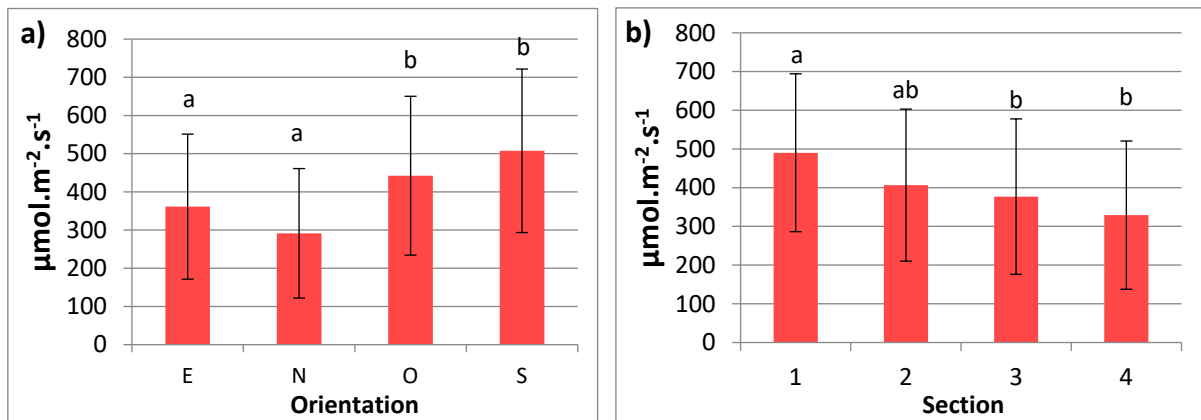


Figure 19 : Résultats d'intensité lumineuse moyenne reçue par les salades « Rougette » selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Les valeurs d'intensité lumineuse sont exprimées en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Les lettres a, b, c indiquent les différences significatives selon le test Tukey de comparaison multiple de moyennes au seuil $p\text{-value} \leq 0.05$. La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative. La barre verticale représente l'écart-type.

Les orientations Sud et Ouest (507,5 et 442,3 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) ont reçu significativement plus d'intensité lumineuse que les orientations Nord et Est (291,5 et 361,3 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (Figure

19a). On note une diminution de l'intensité lumineuse de 42% entre l'orientation Sud et l'orientation Nord.

L'intensité lumineuse a tendance à diminuer avec la hauteur (Figure 19b). La section 1 ($490,2 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) a reçu en moyenne une intensité significativement plus importante que les sections 3 et 4 ($376,8$ et $329,0 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). La section 2 avec $406,5 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ n'a pas reçu significativement plus d'intensité lumineuse que les autres sections (Figure 19b). On note une diminution de l'intensité lumineuse de 33% entre la section 1 et la section 4.

III.1.4 Interprétation et discussion des résultats d'intensité lumineuse

Nous avons pu constater que l'intensité lumineuse reçue selon la section diminuait avec la hauteur. En effet, sur les trois colonnes, l'intensité lumineuse diminue en moyenne de 33% à 62% entre la section la plus haute (section 1) et la plus basse (section 4) (Figure 17, Figure 18, Figure 19).

Cette tendance a déjà été observée en système vertical avec une diminution de l'intensité lumineuse allant de 40% à 62% entre le haut et le bas du système (Liu et al., 2005 ; Velasco-López et al., 2020 ; Touliatos et al., 2016). Cet effet de la section est lié à l'ombre portée des différentes colonnes les unes par rapport aux autres (Liu et al., 2005) et également à la canopée des plants hauts qui apportent de l'ombre aux plants plus bas (Lopez-Lozano et al., 2007 ; Velasco-López et al., 2020).

L'effet de l'orientation est avéré sur les colonnes de fraises et de salades « Rougette ». Nous avons mesuré pour ces deux colonnes une diminution de l'intensité lumineuse de 42% à 58% entre l'orientation Sud et l'orientation Nord (Figure 17, Figure 19). Cette observation est confirmée par l'étude de Liu et al. (2005) qui ont constaté une diminution de l'intensité lumineuse de 42 à 70% entre le Nord et le Sud d'une colonne de culture. Le site Cour des Lions est orienté Est-Ouest et un mur est présent sur le côté Nord. Ces résultats semblent donc cohérents avec la disposition du site (Figure 2).

Cependant nous n'avons pas observé de différences d'ensoleillement entre les orientations sur la colonne de salades « Gotham ». On peut supposer la configuration des colonnes et des structures de bambous aux alentours de la colonne de salades « Gotham » ait mené à ce résultat non significatif (Figure 2).

Les résultats obtenus en croisant les facteurs « orientation » et « section » sont disparates comme nous le montrent les Figures 20a, b, c. D'après les tests statistiques, nous constatons des différences significatives entre une multitude de traitements (section x orientation) ce qui rend difficile l'interprétation de ces résultats. On observe néanmoins une tendance globale pour les trois plantes. Les intensités lumineuses moyennes semblent plus faibles au Nord et plus fortes au Sud et la section 1 reçoit en moyenne plus de lumière que la section 4 (Figure 20a, Figure 20b, Figure 20c). Les configurations des colonnes et des structures de bambous aux alentours étant propres à chaque colonne, l'intensité lumineuse de chaque traitement (section x orientation) est unique.

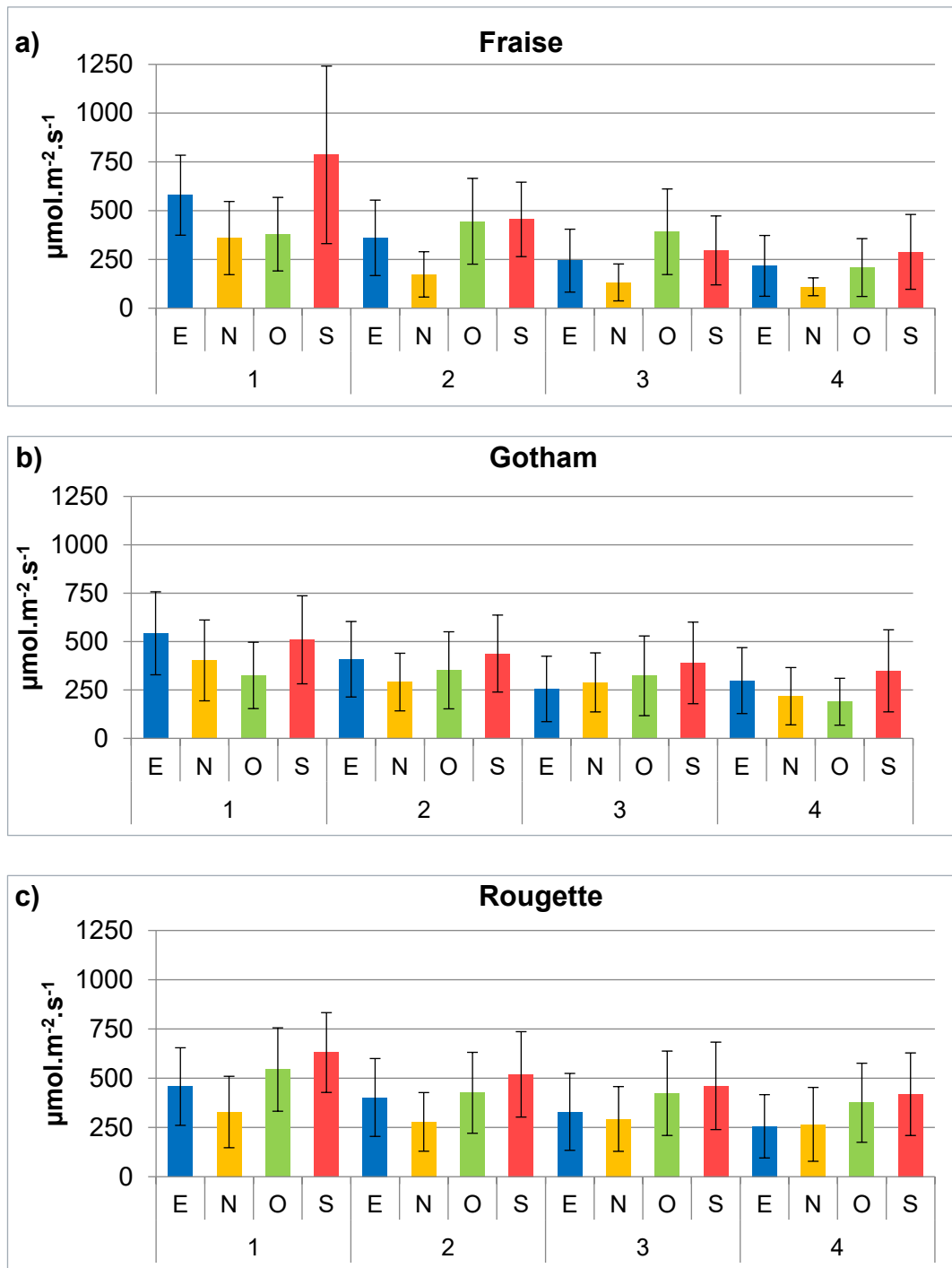


Figure 20 : Résultats d'intensité lumineuse moyenne reçue par les salades et les fraises selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). La barre verticale représente l'écart-type.

III.2 Rendement et qualité des fraises

III.2.1 Rendement moyen commercialisable par fraisier

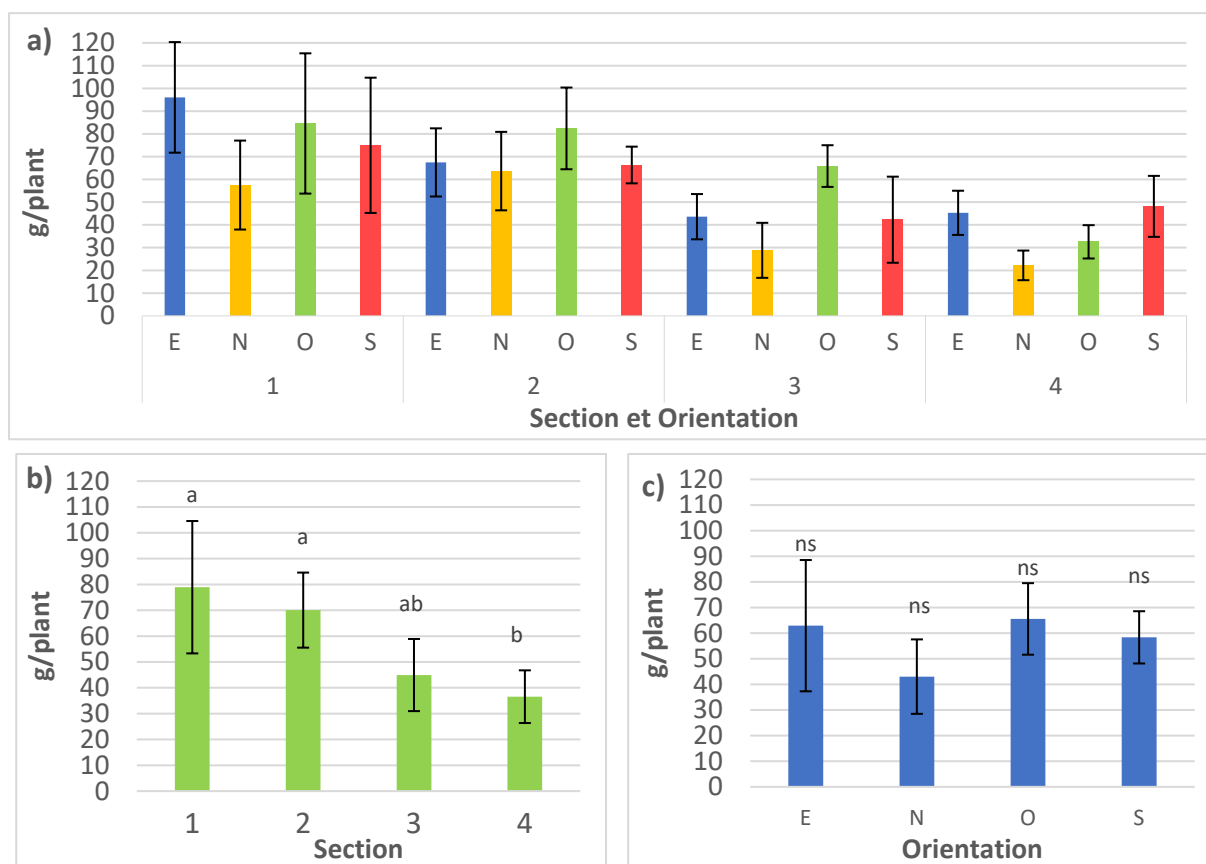


Figure 21 : Rendement moyen commercialisable par fraisier selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Le rendement est exprimé en g/plant. Les lettres a et b indiquent les différences significatives selon le test Dunn de comparaison multiple de moyennes au seuil p -value ≤ 0.05 . La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative. La barre verticale représente l'écart-type.

Les valeurs de rendement moyen commercialisable selon l'orientation varient de 43g/plant (Nord) à 65,5 g/plant (Ouest) (Figure 21c). L'analyse statistique n'a démontré aucune différence significative de rendement moyen par plant selon l'orientation. Les valeurs moyennes de rendement commercialisable par fraisier présentent des différences significatives selon la hauteur (Figure 21b). Les rendements moyens des fraisiers situés sur les sections 1 et 2 ne sont pas significativement différents et sont, en moyenne, 49% plus élevés que le rendement moyen des fraisiers de la section 4 (Figure 21b).

Le test de Kruskal-Wallis indique qu'il y a un effet de l'interaction des deux facteurs sur le rendement. Cependant le test Dunn de comparaison multiple de moyennes n'a mis en évidence aucunes différences significatives entre les traitements (ANNEXE 3). On ne peut donc pas conclure sur la significativité des résultats du croisement des facteurs (Figure 21a). On observe néanmoins une tendance de diminution du rendement selon la hauteur avec des rendements souvent plus faibles au Nord (Figure 21a).

Le rendement moyen commercialisable diminue selon la hauteur (Figure 21b). Cette tendance coïncide avec les résultats de Velasco-López et al. (2020) montrant en moyenne un rendement en fraises des sections les plus hautes 47% à 84% supérieur à celui des sections basses en système de culture vertical.

La diminution de rendement moyen des fraisiers en fonction de la hauteur peut être associée à une baisse de l'intensité lumineuse sur les sections basses (Aydin et al., 2013 ; Tang et al., 2020 ; Velasco-López et al., 2020 ; Zhong et al., 2011).

Dans notre étude, les intensités mesurées selon la section varient de 528,2 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (section 1) à 205,9 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (section 4) (Figure 17b). La plage d'intensité lumineuse idéale pour le fraisier est comprise entre 200 et 400 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et le point de saturation de l'activité photosynthétique du fraisier est atteint entre 800 et 1200 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ selon les variétés (Carlen et al., 2009 ; Torres et al., 2011).

L'activité photosynthétique des plants en haut de la colonne était donc potentiellement plus importante que les plants plus bas (Ramirez-Gómez et al., 2012). Le rendement a donc pu être affecté par cette différence d'intensité lumineuse moyenne sur les sections de la colonne (Calvete et al., 2007 ; Ramirez-Gómez et al., 2012 ; Tang et al., 2020 ; Velasco-López et al., 2020 ; Zhong et al., 2011).

D'après le test de corrélation de Spearman, une corrélation significative entre les valeurs d'intensité lumineuse et le rendement est avérée à 46% (Coefficient de corrélation = 0,46 ; p-value = $4,8644.10^{-6}$) (ANNEXE 4). Cette corrélation est assez basse, comparée aux résultats de Velasco-López et al. (2020) ($R^2 = 0,8$).

De plus, l'intensité lumineuse mesurée sur l'orientation Nord de la colonne de fraises est significativement plus faible que les autres orientations (193,7 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ Nord ; 459,2 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ Sud) (Figure 17a). Cependant, aucune différence significative de rendement n'est avérée selon l'orientation.

Nous ne pouvons donc pas affirmer que le lien de causalité entre l'intensité lumineuse et le rendement des fraisiers soit mis en évidence dans notre étude. Afin d'approfondir l'étude de l'impact de la lumière, il serait intéressant de mesurer l'activité photosynthétique des fraisiers (Ramirez-Gómez et al., 2012). On peut suggérer l'utilisation d'un appareil portatif de type fluoromètre qui permet de traduire l'efficacité des photosystèmes de la plante (Carlen et al., 2009 ; Tang et al., 2020). Cependant, l'acquisition d'un tel appareil demanderait un investissement non négligeable pour l'entreprise.

Des facteurs plus influents ou interagissant avec la lumière ont pu engendrer une différence de rendement.

L'aspersion des racines étant gravitaire, nous pouvons supposer qu'une irrigation inégale aurait favorisé les plants en haut de colonne. Un déficit d'irrigation provoque

effectivement une baisse de rendement des fraisiers (Liu et al., 2006). L'eau étant enrichie en nutriments, un déficit d'irrigation a pu engendrer un déficit nutritionnel entraînant une baisse de rendement (Lee et al., 2015). L'hypothèse d'un gradient de nutrition des plantes en fonction de la hauteur a également été soulevée par Touliatos et al. (2016) en culture verticale de salades. Il serait donc intéressant de mesurer la teneur en nutriments des fraisiers mais les méthodes de mesures restent peu abordables.

La température joue également un rôle important dans le développement du fraisier (Carlen et al., 2009 ; Palencia et al., 2013 ; Tang et al., 2020). Il semblerait même que l'interaction entre l'intensité lumineuse et la température ait un effet significatif sur le rendement des fraisiers (Carlen et al., 2009 ; Palencia et al., 2013 ; Tang et al., 2020). L'hypothèse d'un gradient de lumière et de température sur la hauteur de la colonne pourrait donc expliquer la variation du rendement moyen des fraisiers. Une mesure de la température au niveau des sections et orientations de la colonne serait donc envisageable.

III.2.2 Taux de sucre moyen des fruits

Nous rappelons que les résultats de taux de sucre sont exprimés en degré Brix. Le degré Brix est une mesure du taux de sucre en gramme pour 100g de jus de fruits que l'on peut donc appeler à un pourcentage de sucre (Nielsen et al., 2010).

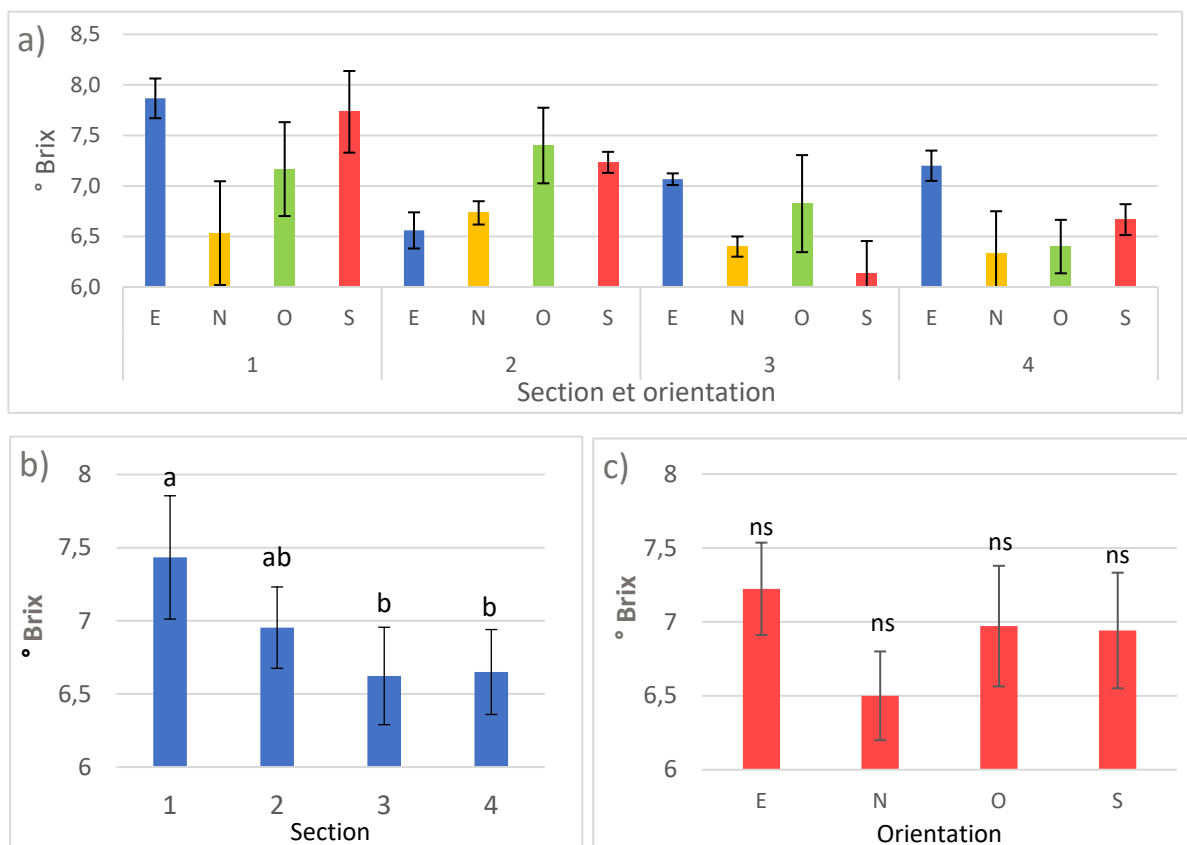


Figure 22 : Taux de sucre moyen des fraises selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Le taux de sucre est exprimé en degré Brix (% sucre). Les lettres a et b indiquent les différences significatives selon le test Dunn de comparaison multiple de moyennes au seuil p -value ≤ 0.05 . La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative. La barre verticale représente l'écart-type.

Le taux de sucre de la section 1 (7,4 %) est significativement plus élevé que celui des sections 3 et 4 (6,62% et 6,65%) (Figure 22b). Il y a donc un écart de 0,78% de sucre entre la section 1 et les sections 3 et 4. Cette tendance est observée dans l'étude de Velasco-López et al. (2020) et de Ramirez-Gómez et al. (2012) montrant un taux de sucre des fraises plus élevé pour les fraisiers les plus hauts. Les taux de sucre moyens selon l'orientation varient de 6,5% (Nord) à 7,2% (Est) (Figure 22c). L'analyse statistique n'a démontré aucunes différences significatives de taux de sucre moyen selon l'orientation.

Le test de Kruskal-Wallis indique qu'il y a un effet de l'interaction des deux facteurs sur le taux de sucre alors que le test Dunn de comparaison multiple de moyennes n'a mis en évidence aucunes différences significatives entre les traitements (ANNEXE 3). On ne peut donc pas conclure sur la significativité des résultats du croisement des facteurs (Figure 22a).

La variation du taux de sucre des fraises peut être liée à une variation d'intensité lumineuse sur la colonne (Cervantes et al. 2019 ; Velasco-López et al., 2020). En effet, l'exposition des fraisiers impacte la qualité organoleptique du fruit (Cervantes et al. 2019).

D'après le test de corrélation de Spearman, la corrélation entre les valeurs d'intensité lumineuse et de taux de sucre est de 37%, ce qui est assez bas (Coefficient de corrélation = 0,37 ; p-value = 0,005) (ANNEXE 4).

De plus, l'intensité mesurée sur l'orientation Nord de la colonne de fraises est significativement plus faible que les autres orientations (193,7 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ Nord, 459,2 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ Sud) (Figure 17a). Cependant, aucunes différences significatives de taux de sucre ne sont avérées selon l'orientation (Figure 22c).

Le lien entre intensité lumineuse et taux de sucre des fraises n'est pas mis en évidence dans notre étude. Ainsi, un ou plusieurs autres facteurs plus influents, ou interagissant avec la lumière, ont possiblement impacté le taux de sucre.

Comme évoqué en partie III.2.1, l'hypothèse d'un gradient de nutrition des plantes en fonction de la hauteur est envisageable en système de culture vertical. Touliatos and al. (2016) a notamment soulevé cette hypothèse pour une culture de salade verticale. Un déficit de nutrition des plantes couplé à une mauvaise exposition au soleil engendrerait donc une baisse significative du taux de sucre des fruits (Caruso et al., 2011).

III.2.3 Taux d'acide moyen des fruits

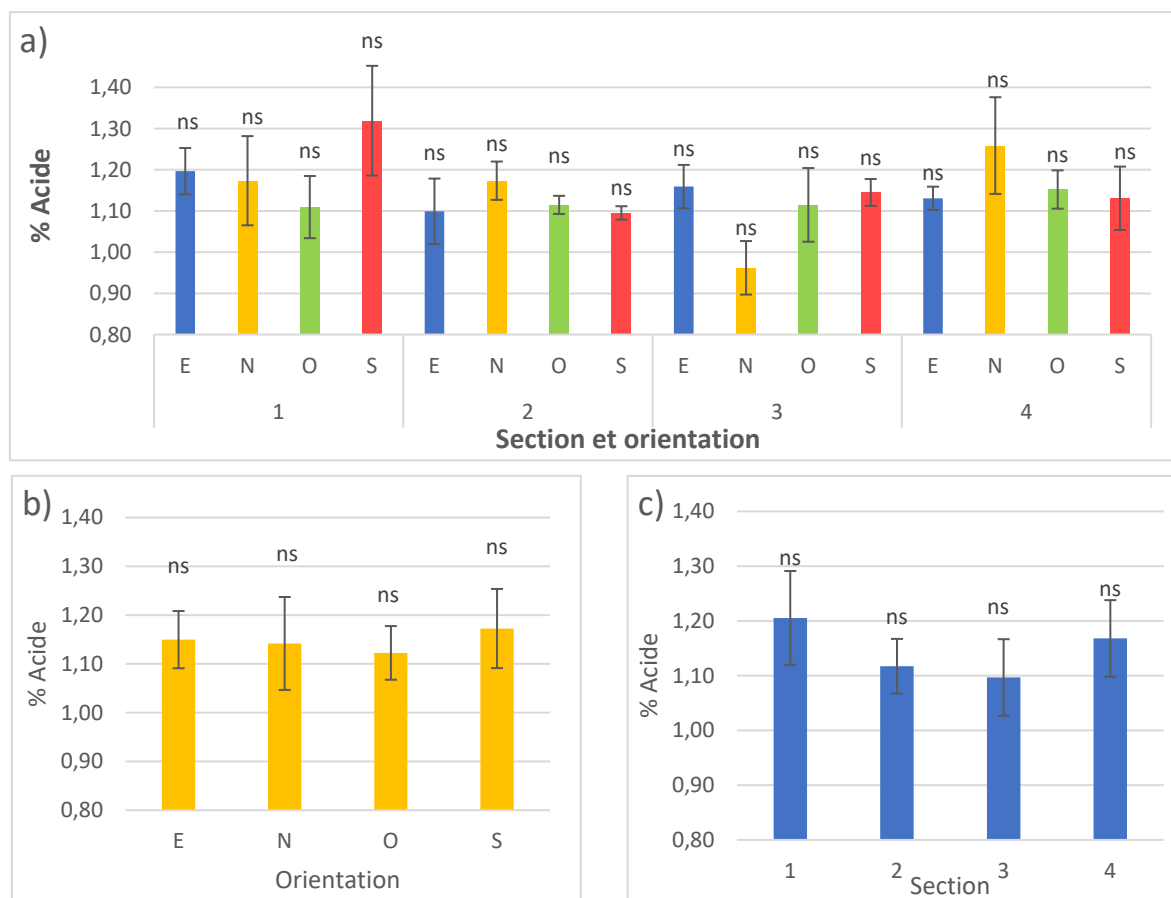


Figure 23 : Taux d'acide moyen des fraises selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Le taux d'acide est exprimé en % acide. Les lettres a et b indiquent les différences significatives selon le test Kruskal-Wallis au seuil $p\text{-value} \leq 0.05$. La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative. La barre verticale représente l'écart-type.

Les valeurs d'acidité moyenne des fraises mesurées sur l'ensemble des échantillons varient de 0,96% et 1,32% (Figure 23).

Le test de Kruskal-Wallis n'a pas mis en évidence des taux d'acide significativement différents selon la section, l'orientation et le traitement (section x orientation) (Figure 23). On ne peut donc pas affirmer que les fraises présentent des taux d'acide différents. De plus, aucune corrélation n'est avérée entre l'intensité lumineuse et le taux d'acide.

Les propriétés organoleptiques des fraises sont principalement liées à la fertilisation, l'irrigation, la température et l'exposition à la lumière (Taghavi et al., 2019). Un lien entre l'exposition à la lumière et la teneur en acide des fruits a été étudié par Cervantes et al. (2019) mais n'a pas permis de mettre en évidence une réelle corrélation.

La mesure du taux d'acide ayant été réalisée par titrage colorimétrique, l'absence de significativité des résultats peut être imputée au manque de précision de la méthode de

mesure employée. En effet, la coloration rouge du jus de fraise a pu mener à des erreurs d'interprétation du point de titrage. Un matériel plus adapté tel qu'un acidimètre portatif aurait permis d'effectuer des mesures plus précises (ex : Appareil PAL-BX-ACID développé par ATAGO®).

III.2.4 Conclusion intermédiaire

Tableau 1 : Synthèse des résultats obtenus pour les colonnes de fraises selon la section, l'orientation et le traitement (section x orientation). Les signes indiquent le niveau de significativité de l'effet du facteur sur la variable : « - » $p\text{-value} > 0.05$; « * » $p\text{-value} \leq 0.05$; « ** » $p\text{-value} \leq 0.01$; « *** » $p\text{-value} \leq 0.001$.

	Fraises		
	Rendement	Taux de sucre	Taux d'acide
Section	***	*	-
Orientation	-	-	-
Section x Orientation	*	*	-

Dans notre étude, un effet de la hauteur est avéré sur le rendement moyen commercialisable des fraisiers et sur le taux de sucre moyen des fraises (Tableau 2). Cependant, l'orientation ne semble pas impacter le rendement et la qualité des fraises malgré des intensités lumineuses différentes (Tableau 2, Figure 17a). Le croisement des deux facteurs présente un effet moindre sur la qualité et le rendement des fraisiers (Tableau 2).

Plusieurs études menées en système vertical ont mis en évidence une diminution de l'intensité lumineuse en fonction de la hauteur des plants entraînant une baisse de rendement et de qualité des fraisiers (Calvete et al., 2007 ; Ramirez-Gómez et al., 2012 ; Velasco-López et al., 2020).

Afin d'approfondir l'étude de l'impact de la lumière, une mesure de l'activité photosynthétique des fraisiers à l'aide d'un fluoromètre serait intéressante mais coûteuse (Carlen et al., 2009 ; Ramirez-Gómez et al., 2012 ; Tang et al., 2020).

L'effet de la hauteur des plants sur le rendement et la qualité peut être lié à d'autres facteurs non mesurés dans cette étude. Une mesure de la température des plantes pourrait notamment être menée afin d'étudier son impact sur le rendement et la qualité des plantes (Palencia et al., 2013).

Le taux d'acide moyen des fruits mesuré n'était pas significativement différent selon la section, l'orientation et le traitement. L'usage d'une autre méthode de mesure permettrait de mieux évaluer l'acidité des fraises avec un appareil adapté.

Les disparités générales de productivité et de qualité des fraisiers en système hydroponique vertical sont déjà connues par l'entreprise Agripolis et ont également été

citées dans diverses études (Calvete et al., 2007 ; Velasco-López et al., 2020). De ce fait, l'entreprise souhaite maximiser la part de fruits commercialisables et la qualité des fraises. Les fraisiers ont principalement été impactés par la hauteur du système et on constate que les fraisiers les plus productifs et qualitatifs étaient situés sur les sections les plus hautes (section 1 et 2). Une association avec une culture moins impactée par la hauteur serait à envisager (Fraisiers en section 1,2 et plantes aromatiques en section 3,4 par exemple.)

Un étude approfondie similaire serait à mener sur d'autres plantes afin d'optimiser au mieux la position des plantes sur une colonne de culture.

III.3 Productivité et qualité des salades « Rougette » et « Gotham »

III.3.1 Rendement et volume des salades « Rougette » et « Gotham »

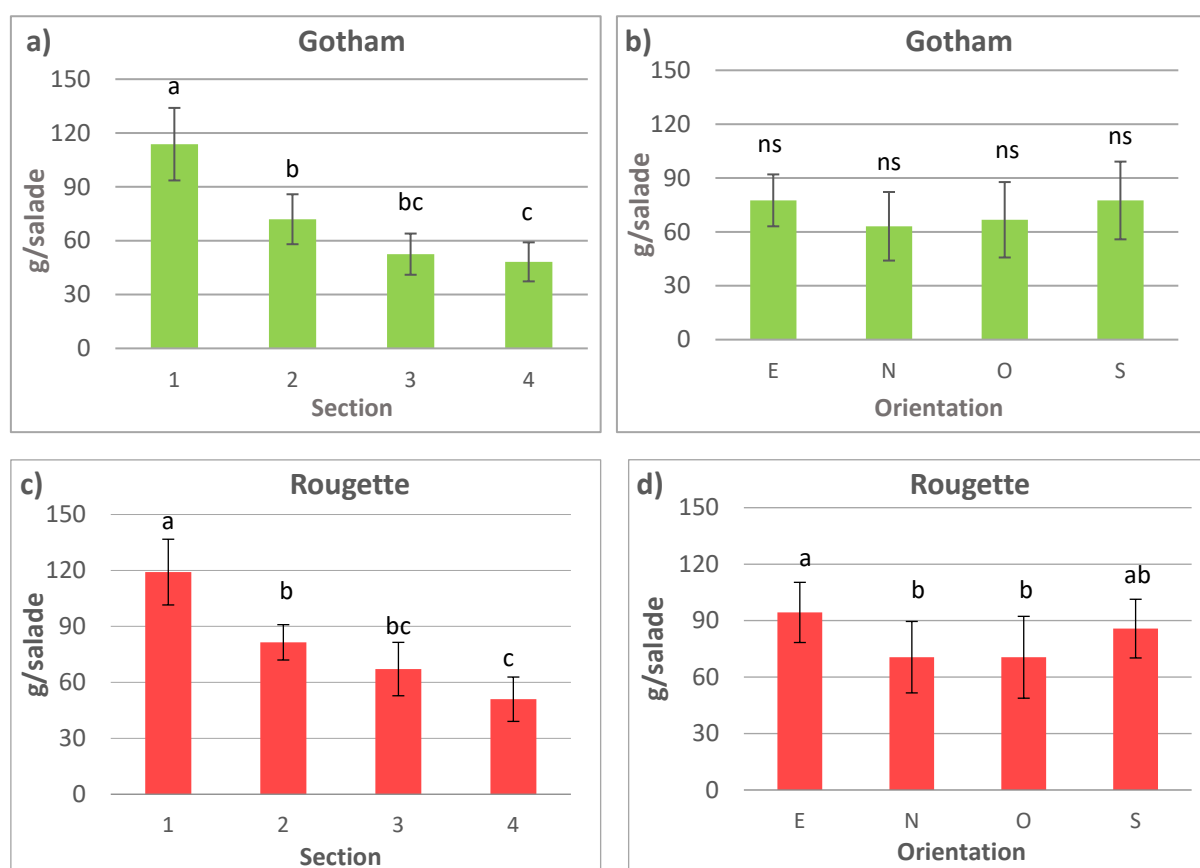


Figure 24 : Rendement moyen d'une salade « Gotham » et « Rougette » selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Le rendement est exprimé en g/salade. Les lettres a, b, c indiquent les différences significatives selon les tests Tukey et Dunn au seuil p -value ≤ 0.05 . La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative. La barre verticale représente l'écart-type.

Les valeurs moyennes de rendement des deux variétés sont significativement différentes selon la section (Figure 24a,c). Avec des rendements moyens de 113,8g pour les salades « Gotham » et 119,13g pour les « Rougette », la section 1 présente un rendement deux

fois plus élevé que la section 4 (48,21 g « Gotham » et 50,9 g « Rougette ») (Figure 24a,c). On observe donc une diminution du rendement avec la hauteur.

Les rendements moyens des salades « Rougette » sont significativement plus élevés pour l'orientation Est (77,57g) par rapport au Nord (70,6g) et à l'Ouest (70,5g) (Figure 24d). Les salades situées au Sud n'ont pas un rendement significativement différent des autres orientations (Figure 24d). Les salades « Gotham » ne présentent pas de rendements significativement différents selon l'orientation (Figure 24b).

Les résultats de rendement moyen des salades « Gotham » ne sont pas significatifs selon le traitement (section x orientation) (ANNEXE 6 Figure 3). Le test de Kruskal-Wallis indique qu'il y a un effet de l'interaction des deux facteurs sur le rendement des salades « Rougette », cependant les test Dunn de comparaison multiple de moyennes n'a mis en évidence aucune différences significatives entre les traitements (ANNEXE 2, ANNEXE 6 Figure 3). On ne peut donc pas conclure sur la significativité des résultats du croisement des facteurs. Néanmoins, on constate une tendance de diminution du rendement selon la hauteur et des rendements souvent plus faibles au Nord.

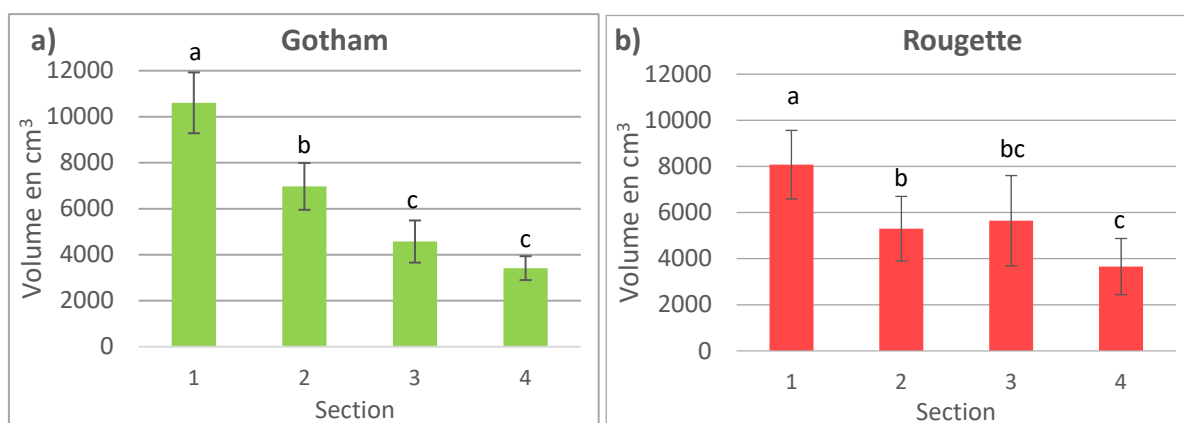


Figure 25 : Volume moyen d'une salade « Gotham » et « Rougette » selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Le volume est exprimé en cm³. Les lettres a, b, c indiquent les différences significatives selon les test Tukey et Dunn au seuil p-value ≤ 0.05 . La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative. La barre verticale représente l'écart-type.

Comme pour le rendement moyen, une baisse significative du volume moyen des salades selon la section est avérée pour les deux variétés (Figure 25a,b). En effet, les salades « Gotham » en section 1 (10604 cm³) sont 67% plus volumineuses que celles situées en section 4 (3417 cm³) (Figure 25a). Les salades « Rougette » en section 1 (8100 cm³) sont 54% plus volumineuses que la section 4 (3700 cm³) (Figure 25b).

Les résultats de volume moyen obtenus pour les deux salades ne sont pas significativement différents selon l'orientation (ANNEXE 6 Figure 2 et 4).

Selon l'orientation, les valeurs obtenues pour les salades « Gotham » oscillent entre 7044 cm³ (Sud) et 6006 cm³ (Est) et celles obtenus pour les salades « Rougette » entre 7300 cm³ (Est) et 4500 cm³ (Nord) (ANNEXE 6 Figure 4).

Selon le traitement, le volume mesuré des salades « Gotham » varie entre 11400 cm³ (1 Sud et 1 Nord) et 3300 cm³ (4 Nord) et celui des salades « Rougette » entre 9300 cm³ (1 Nord) et 2100 cm³ (4 Nord) (ANNEXE 6 Figure 2). L'effet du traitement sur le volume est significatif pour les salades « Rougette » mais pas pour les salades « Gotham ». Le test de Dunn n'a cependant pas mis en évidence de différences de volume entre les traitements pour les salades « Rougette » (ANNEXE 2).

Il est important de noter qu'une partie des salades a subi une élongation de la tige qui a pu constituer un biais pour les mesures de volume (l'élongation des salades est traitée en partie III.3.2). Il faut donc émettre une certaine réserve sur la fiabilité de ces résultats.

Pour les deux variétés, nous constatons une baisse du rendement et du volume des salades avec la hauteur. Cette tendance est également observée en système de culture vertical avec des pertes de rendement allant jusqu'à 43% entre le haut et le bas de la colonne (Liu et al., 2005 ; Touliatos and al., 2016).

La diminution de rendement et de volume des salades en fonction de la hauteur peut être associée à une baisse de l'intensité lumineuse des sections hautes vers les sections basses (Aydin et al., 2013 ; Liu et al., 2005 ; Mandizvidza et al., 2017 ; Touliatos et al., 2016 ; Zhou et al., 2019).

Dans notre étude, les intensités mesurées selon la section varient de 263,6 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (section 4) à 445,0 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (section 1) pour les salades « Gotham » et de 329,0 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (section 4) à 490,2 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (section 1) pour les salades « Rougette » (Figure 18, Figure 19).

Sachant qu'une intensité lumineuse comprise entre 400 et 600 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ est recommandée pour la production de salade (Fallovio et al., 2009 ; Fu et al., 2012), les rendements et volumes des salades situées sur les sections les plus basses ont pu être affectés par un manque de lumière (Aydin et al., 2013 ; Paz et al., 2019 ; Touliatos et al., 2016 ; Zhou et al., 2019).

Le test de corrélation de Spearman indique une corrélation de 50% entre les valeurs d'intensité lumineuse et le rendement pour les deux salades (« Gotham » : Coefficient de corrélation = 0,5 ; p-value = $5,07.10^{-7}$ et « Rougette » : Coefficient de corrélation = 0,48 ; p-value = $1,90.10^{-6}$) (ANNEXE 4). Cette corrélation a également été mise en évidence par Touliatos and al. (2016) sur une variété de laitue. On pourrait donc supposer que la diminution du rendement et du volume selon la hauteur est liée à une diminution d'intensité lumineuse.

Cependant, les intensités lumineuses reçues selon l'orientation des salades « Rougettes » ne semblent pas en adéquation avec les résultats de rendement et de volume (Figure 19a, Figure 24d , ANNEXE 6 Figure 4). En effet, les intensités lumineuses mesurées au Nord et à l'Est (291,5 et 361,3 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) sont significativement plus basses que celles reçues au Sud et à l'Ouest (507,5 et 442,3 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) alors que le rendement le plus fort est à

l'Est (Figure 19a, Figure 24d). De plus, les volumes moyens ne sont pas significativement différents selon l'orientation pour les deux variétés. Les salades « Gotham » ne présentent aucune différence significative de rendement, de volume et d'intensité lumineuse selon l'orientation (Figure 18a, Figure 24b, ANNEXE Figure 4)

Nous ne pouvons donc pas affirmer que le lien de causalité entre la lumière et le rendement et volume des salades est mis en évidence dans notre étude.

Afin d'approfondir notre étude, il serait intéressant de mesurer l'activité photosynthétique des salades via un appareil adapté (ex. fluoromètre) (Carlen et al., 2009 ; Ramirez-Gómez et al., 2012 ; Tang et al., 2020). Cette mesure demanderait cependant un investissement financier important.

Des facteurs plus influents ou interagissant avec la lumière ont pu impacter la productivité.

Comme évoqué en partie II.2, l'aspersion des racines étant gravitaire, la ferti-irrigation peut être inégale et créer un gradient d'hétérogénéité du haut vers le bas de la colonne. Cette hypothèse est également soulevée par Touliatos and al. (2016), supposant une distribution inégale des nutriments liée à la verticalité du système. Un déficit de fertilisation et d'irrigation affecterait donc négativement la productivité des salades en bas de colonne (Falovo et al., 2009 ; Fu et al., 2017).

De plus, Fu et al. (2017) ont notamment mis en évidence l'effet de l'interaction entre l'intensité lumineuse et la concentration en azote de la solution nutritive sur la croissance et la qualité des salades. Une faible intensité lumineuse accompagnée d'une sous-fertilisation défavoriserait la production de biomasse de la salade (Fu et al., 2017). Cette hypothèse pourrait donc expliquer une baisse de rendement sur les sections les plus basses.

La température joue un rôle important dans le développement de la salade (Subblett et al., 2018 ; Zhou et al., 2019). Zhou et al. (2019) ont notamment mis en évidence que la qualité et la croissance des salades étaient régies par l'interaction de la lumière avec la température. Ainsi, l'absorption des nutriments varie selon la combinaison de ces deux facteurs (Zhou et al., 2019). Cette interaction expliquerait donc une variation de rendement selon la section et également selon l'orientation (notamment pour les salades « Rougette » dont le rendement est impacté par la section et par l'orientation) (Figure 24 a,b,c,d).

Afin de vérifier ces hypothèses, une étude plus approfondie de la température et de la ferti-irrigation serait à envisager. Il serait notamment intéressant de mesurer la température de la colonne à différentes sections et orientations (Subblett et al., 2018 ; Zhou et al., 2019).

La qualité de la lumière impacte également la croissance des salades (Massa et al., 2015 ; Tosti et al., 2018). L'évaluation de la qualité de la lumière peut s'effectuer à l'aide d'un

appareil de mesure de spectres (type LI-190R « Quantum sensor » de l'entreprise LI-COR® par exemple). Ce type d'appareil reste néanmoins très coûteux.

Notons que les comportements des deux variétés de salades sur les colonnes ont été différents. En effet, on constate un effet de l'orientation sur le rendement des salades « Rougette » alors qu'il n'est pas avéré pour les salades « Gotham » (Figure 24a,b,c,d). Cette observation est liée principalement aux facteurs « variété » et « environnement ». Les variétés étant différentes et les conditions environnementales de chaque colonne étant uniques (position sur le site, exposition à la lumière, température, humidité, cultures voisines), les réponses de salades en termes de productivité ont été différentes (Mandizvidza et al., 2017).

III.3.3 Pommaison des salades « Rougette » et « Gotham »

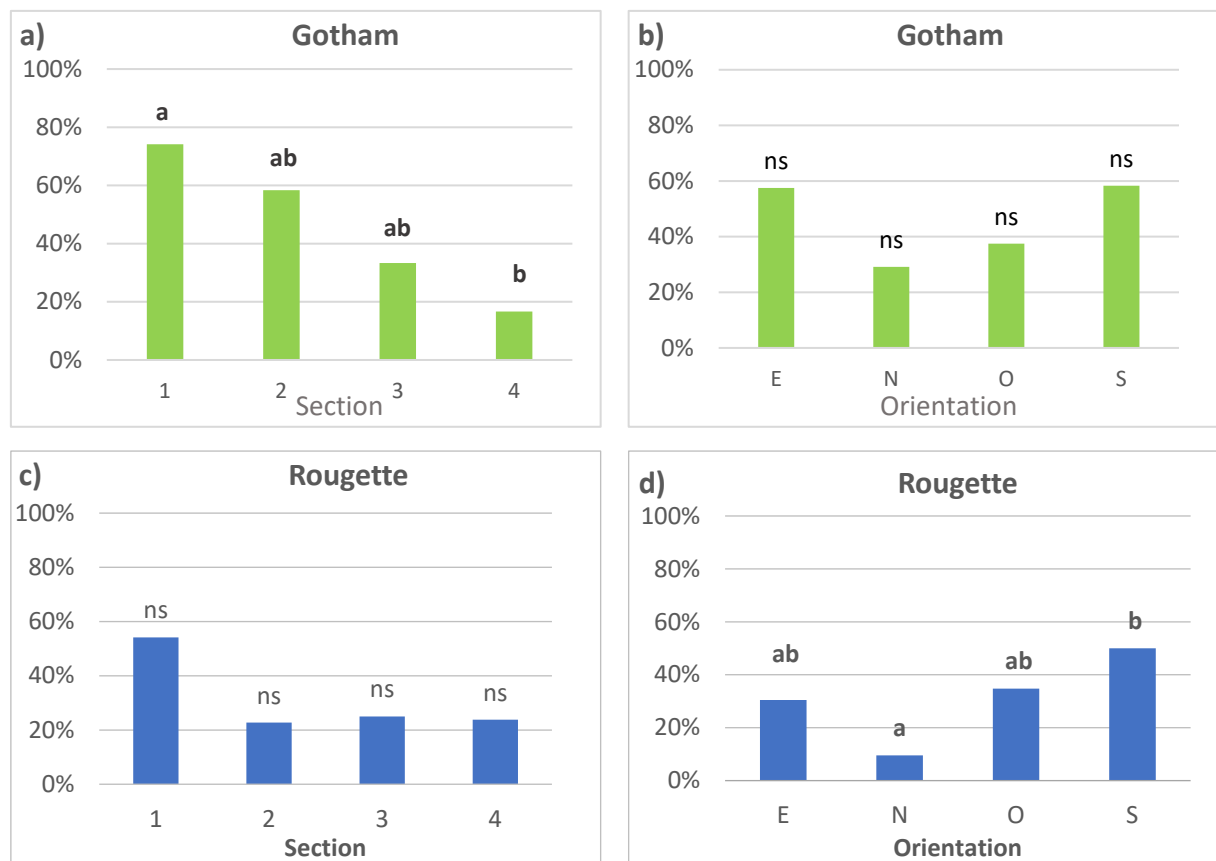


Figure 26 : Pourcentage de salades pommées (variété « Rougette » et « Gotham ») selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Les lettres a, b, c indiquent les différences significatives selon le test du Chi² au seuil p-value ≤ 0.05. La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative.

Pour les salades « Gotham », le pourcentage de pommaison décroît de la section 1 (74%) à la section 4 (17%) (Figure 26a). Le test du Chi² indique que les salades pommées sont plus représentées en section 1 qu'en section 4 (Figure 26a). En revanche, pour les salades

« Rougette », cette tendance n'est pas observée. La section n'a pas d'effet significatif sur le pourcentage de salades pommées. Les pourcentages mesurés oscillent entre 54% (section 1) et 23% (section 2) (Figure 26c).

Les salades « Rougette » présentent un plus fort pourcentage de pommaison sur l'orientation Sud (50%) par rapport à l'orientation Nord (10%) (Figure 26d). Le test du Chi² indique que les salades pommées sont plus représentées au Sud qu'au Nord (Figure 26d). Le pourcentage de pommaison des salades « Gotham » n'est pas significativement impacté par l'orientation. Les pourcentages mesurés varient entre 58 % (Est et Sud) et 29% (Nord) (Figure 26b). Les pourcentages de pommaison selon le traitement sont très variables et ne permettent pas de déceler des différences significatives de pourcentage (ANNEXE 6 Figure 1).

La hauteur a donc un effet sur la pommaison des salades « Gotham » et non sur celle des salades « Rougette ». De plus, un effet de l'orientation est avéré pour les salades « Rougette » et non pour les salades « Gotham ».

La formation de la pomme de la salade est dépendante de la température, de l'intensité et de la qualité de la lumière (Al-Said et al., 2018 ; Lee et al., 2019 ; Paz et al., 2019). En effet, l'exposition à une trop faible intensité lumineuse induit des changements morphologiques au niveau des feuilles (allongement et écartement des feuilles notamment) (Kang et al., 2016 ; Paz et al., 2019 ; Snowden et al., 2016). Une température extérieure trop élevée aura tendance à favoriser l'élongation de la tige au détriment de la pommaison (Al-Said et al., 2018 ; Lee et al., 2019). Cette élongation permet difficilement la formation de feuilles compactes. Néanmoins, Al-Said et al. (2018) ont observé qu'une salade ayant entamé une élongation liée à de fortes températures pouvait former une pomme. C'est pourquoi dans notre étude, certaines salades sont pommées tout en présentant une élongation de la tige.

Lee et al. (2019) ont mis en évidence un effet de l'interaction de la lumière et de la température sur la formation de la pomme de la salade. Cet équilibre est difficile à cerner et propre à chaque variété (Lee et al., 2019).

Dans notre étude, nous ne pouvons pas affirmer que le pommaison est liée à l'intensité lumineuse. Cependant, aux vues des fortes chaleurs constatées au cours des deux semaines précédant la récolte (ANNEXE 9), on peut supposer que la pommaison des salades ait été impactée.

III.3.4 Elongation des salades « Rougette » et « Gotham »

Tableau 2 : Effectifs de salades pour chaque niveau d'élongation selon la section et l'orientation (0 = pas d'élongation, 1 = collet bombé, 2 = tige apparente, 3 = plus d'1cm de tige apparente). ** = effectif significativement plus grand pour chaque niveau d'élongation, * = effectif significativement plus faible pour chaque niveau d'élongation.

Salades « Rougette »				
Section	Niveaux d'élongation			
	0	1	2	3
1	-	5**	9	10*
2	-	-	3	19
3	-	1	6	17
4	-	2	3	16

Salades « Rougette »				
Orientation	Niveaux d'élongation			
	0	1	2	3
Est	-	1	8	14
Nord	-	3	3	15
Ouest	-	3	6	14
Sud	-	1	4	19

Salades « Gotham »				
Section	Niveaux d'élongation			
	0	1	2	3
1	-	6 **	5 **	12 *
2	-	-	1	23
3	-	-	-	24
4	-	-	-	24

Salades « Gotham »				
Orientation	Niveaux d'élongation			
	0	1	2	3
Est	-	1	1	21
Nord	-	2	-	22
Ouest	-	2	2	20
Sud	-	1	3	20

Nous constatons que les deux variétés de salades présentent une élongation avec une prédominance du niveau d'élongation 3 (Tableau 3). Un effet significatif de la section sur les effectifs d'élongation des deux salades est mis en évidence (Tableau 3). D'après le test du Chi², les salades de niveau d'élongation 1 sont sur-représentées en section 1 et l'élongation 3 est sous-représentée en section 1 pour les salades « Rougette ». Pour les salades « Gotham », les effectifs des salades de niveau d'élongation 1 et 2 sont sur-représentés en section 1 tandis que les salades de niveau 3 sont sous représentées en section 1 (Tableau 3).

Un fort taux d'élongation de la tige est constaté pour les deux variétés avec néanmoins une légère baisse de cette élongation sur la section la plus haute. En effet, au total, 68% des salades « Rougette » et 87% des salades « Gotham » présentent une élongation de niveau 3 (Tableau 3). On peut supposer que cette élongation soit liée à un manque de lumière (Kang et al., 2016 ; Mandizvidza et al., 2017 ; Snowden et al., 2016).

Mandizvidza et al. (2017) ont notamment mis en évidence une augmentation de la hauteur du plant significative avec l'ombrage. L'élongation des tiges serait donc un phénomène

d'évitement face à une intensité lumineuse trop faible (Kang et al., 2016 ; Mandizvidza et al., 2017).

A noter que l'initiation de l'élongation dépend également de la variété (Mandizvidza et al., 2017 ; Paz et al., 2019). Mandizvidza et al. (2017) ont observé qu'une laitue romaine développait sa surface foliaire afin de mieux capter la lumière alors qu'une laitue iceberg avait tendance à allonger sa tige. Les réponses des variétés de salade peuvent être différentes par rapport à une intensité lumineuse insuffisante, c'est pourquoi la proportion de salades ayant subi une élongation n'est pas identique pour les salades « Rougette » et « Gotham » (Mandizvidza et al., 2017).

La qualité de la lumière est également un facteur d'élongation de la tige des salades (Snowden et al., 2016). Il a été mis en évidence que la longueur de la tige a tendance à augmenter avec un fort niveau de lumière verte ce qui souvent indique que la plante est située sous un feuillage assez dense (Kang et al., 2016 ; Snowden et al., 2016). Cette supposition pourrait se vérifier dans notre étude car en effet, les plants situés en bas de colonne sont ombragés par la canopée des sections supérieures.

Cependant, l'hypothèse d'une élongation de la tige liée à une montée en graine et non à un manque de lumière semble plus plausible. La montaison ou « montée en graine » est un phénomène d'allongement des entre-nœuds de la plante afin d'assurer sa floraison et donc sa reproduction (Chen et al., 2018). Ce phénomène est initié par une forte augmentation de la température et un écart de température faible entre le jour et la nuit (Al-Said et al., 2018 ; Spalholz et al., 2020). Les salades ont notamment subi des vagues de fortes chaleurs deux semaines avant la récolte avec des températures atteignant les 37°C (ANNEXE 9). Ainsi, cette période de fortes températures pourrait expliquer que la majeure partie des salades présente un fort degré d'élongation de la tige.

III-3.5 Conclusion Intermédiaire

Tableau 3 : Synthèse des résultats obtenus pour les colonnes de salades selon la section, l'orientation et le traitement (section x orientation). Les signes indiquent le niveau de significativité de l'effet du facteur sur la variable : « - » $p\text{-value} > 0.05$; « * » $p\text{-value} \leq 0.05$; « ** » $p\text{-value} \leq 0.01$; « *** » $p\text{-value} \leq 0.001$. Abréviations : Rend. = Rendement ; Vol. = Volume ; Pomm. = Pomme ; Elong. = Elongation.

	<i>Salade « Gotham »</i>				<i>Salade « Rougette »</i>			
	Rend.	Vol.	Pomm.	Elong.	Rend.	Vol.	Pomm.	Elong.
Section	***	***	***	***	***	**	-	*
Orientation	-	-	-	-	**	-	**	-
Section x Orientation	-	-	-	-	***	**	-	-

Dans notre étude, un effet de la section est avéré sur le rendement, le volume et l'élongation des deux variétés (Tableau 4). La pomme des salades « Rougette » est impactée par l'orientation alors que celle des salades « Gotham » est impactée par la section. Cette hétérogénéité des salades sur la colonne a déjà été observée en système de culture vertical (Touliatos et al., 2016).

L'effet de l'intensité lumineuse sur la productivité et la qualité des salades n'est pas mis en évidence dans notre étude mais celui-ci est avéré à travers la bibliographie (Aydin et al., 2013 ; Liu et al., 2005 ; Mandizvidza et al., 2017 ; Touliatos et al., 2016 ; Zhou et al., 2019).

Afin d'approfondir l'étude de l'impact de la lumière, il serait intéressant d'étudier l'activité photosynthétique et également la qualité de la lumière reçue (Fu et al., 2017 ; Kang et al., 2016 ; Massa et al., 2015 ; Snowden et al., 2016 ; Tosti et al., 2018 ; Zhou et al., 2019). Ces mesures paraissent cependant difficiles à mettre en place car l'acquisition de matériel de mesure reste onéreuse.

L'impact de la température sur la productivité et la qualité de la salade est non négligeable (Al-Said et al., 2018 ; Lee et al., 2019 ; Spalholz et al., 2020 ; Subblett et al., 2018 ; Zhou et al., 2019). Aussi, une mesure de la température extérieure sur chaque traitement (section x orientation) permettrait de détecter des potentiels gradients de température sur la colonne.

Notons que les disparités générales de productivité et de qualité des salades en système hydroponique vertical sont déjà connues par l'entreprise Agripolis et ont également été citées dans diverses études (Liu et al., 2005 ; Touliatos et al., 2016). Une salade ayant subi une élongation ne pourra pas être commercialisée en « salade entière » par l'entreprise mais en salade effeuillée (type salade en sachet par exemple). Ainsi, une mauvaise pomme et/ou une élongation des salades ne signifie pas que celles-ci ne sont pas commercialisables mais qu'un autre circuit de commercialisation sera privilégié. L'entreprise souhaite néanmoins augmenter sa part de commercialisation de salades « entières » afin de mieux les valoriser. Les deux variétés de salade ont été impactées

différemment par les conditions de culture liées à la verticalité du système. Cependant, on ne peut pas affirmer qu'une des deux salades s'est mieux comportée dans le système au vu de l'hétérogénéité de chaque variété sur les colonnes. Il est certain que la majeure partie des salades commercialisables « entières » est située sur les sections les plus hautes (1 et 2). Une association avec une culture moins impactée par la hauteur de la colonne serait à envisager. On pourrait suggérer le placement suivant : Salades sur les sections 1 et 2 et plantes aromatiques sur les sections 3 et 4.

Un étude approfondie similaire serait à mener sur d'autres types de plante afin d'optimiser au mieux la position des plantes sur une colonne de culture.

IV – Synthèse et amélioration de l'étude

Tableau 4 : Synthèse des résultats de l'étude. Les signes indiquent le niveau de significativité de l'effet du facteur sur la variable : « - » $p\text{-value} > 0.05$; « * » $p\text{-value} \leq 0.05$; « ** » $p\text{-value} \leq 0.01$; « *** » $p\text{-value} \leq 0.001$.

		<i>Section</i>	<i>Orientation</i>	<i>Section x Orientation</i>
<i>Fraises</i>	Rendement	***	-	*
	Taux de sucre	*	-	*
	Taus d'acide	-	-	-
<i>Salade « Gotham »</i>	Rendement	***	-	-
	Volume	***	-	-
	Pommaison	***	-	-
	Elongation	***	-	-
<i>Salade « Rougette »</i>	Rendement	***	**	***
	Volume	**	-	**
	Pommaison	-	**	-
	Elongation	*	-	-

Notre étude a montré de façon générale un effet prédominant de la section sur la productivité et la qualité des plantes (Tableau 5). Nous avons mesuré des niveaux d'intensité lumineuse différents selon la section et l'orientation sur chaque colonne de plante, cependant, l'étude ne permet pas d'affirmer qu'il y ait un effet de la lumière avéré sur les plantes. Il semblerait que d'autres facteurs plus influents ou interagissant avec la lumière aient engendré une hétérogénéité de productivité et de qualité des plantes.

Les facteurs potentiels seraient la température, la ferti-irrigation et également la qualité de la lumière.

Afin de mieux identifier ces facteurs de variation, nous suggérons à l'entreprise d'effectuer un suivi de la température sur les différents traitements (section x orientation). Un suivi de l'activité photosynthétique des plantes et de la qualité de la lumière serait idéal également. Cependant, l'investissement dans des appareils de mesure reste conséquent et n'est pas forcément la priorité actuelle de l'entreprise.

Les disparités générales de productivité et de qualité des salades et des fraisiers en système hydroponique vertical sont déjà connues par l'entreprise Agripolis et ont également été citées dans diverses études (Touliatos et al., 2016 ; Velasco-López et al., 2020). L'entreprise souhaite néanmoins limiter l'hétérogénéité des plantes pour une meilleure valorisation de la production. Nous avons constaté que les plantes les plus productives et qualitatives étaient généralement situées sur les sections hautes de la colonne (sections 1 et 2). Une association avec une culture moins impactée par la hauteur de la colonne pourrait être envisagée.

Une étude approfondie similaire serait à mener sur d'autres plantes de la gamme proposée par Agripolis (Plantes aromatiques, Chou kale, Blette) afin d'optimiser au mieux la position des plantes sur une colonne de culture.

Si l'entreprise souhaite réitérer son programme de R&D de manière générale, nous notons qu'une attention particulière doit être accordée aux conditions de culture. Nous avons fait face à divers changements tels qu'une modification du cycle d'irrigation, un changement d'acide dans la solution nutritive ou encore un changement de support des fraisiers (remplacement de la jute par de la mousse) qui ont constitué un biais notable pour les diverses expérimentations menées. L'homogénéité des conditions de cultures est donc à privilégier afin de limiter les biais. Un investissement dans divers appareils de mesures serait également idéal afin d'augmenter la précision de l'étude.

V – Conclusion

L'enjeu de cette étude était d'étudier la productivité et la qualité de fraisiers et de salades selon leur hauteur et orientation sur une colonne aéronique pour ensuite mettre en lien les résultats obtenus avec des données d'intensité lumineuse.

Cette étude a permis de mettre en évidence une hétérogénéité d'ensoleillement des colonnes en constatant notamment un gradient d'intensité lumineuse qui décroît du haut vers les bas de toutes les colonnes et également une baisse d'intensité lumineuse au niveau de l'orientation Nord (non vérifiée pour les colonnes de salades « Gotham ») (Figure 17, Figure 18, Figure 19).

La productivité et qualité des salades et des fraises étaient hétérogènes sur les colonnes et un effet de la hauteur des plants a été avéré pour la quasi-totalité des variables mesurées (Tableau 5). Les effets de l'orientation et du traitement sur les variables mesurées sont moindres que la section (Tableau 5).

Cependant, les corrélations des mesures de productivité et de qualité avec l'intensité lumineuse étaient assez faibles.

L'effet prédominant étant la section, d'autres facteurs liés à la hauteur ont donc impacté le développement des plantes en interaction ou non avec la lumière. Les hypothèses portent notamment sur la répartition de la ferti-irrigation, la température ou encore la qualité de la lumière.

Si l'entreprise souhaite poursuivre son programme de R&D, une étude plus approfondie de ces facteurs serait à envisager.

Agropolis souhaitait, à travers cette étude, optimiser le placement des plantes et idéalement les associer sur une même colonne. Les résultats de cette étude suggèrent que les fraisiers et les salades se développent dans de meilleures conditions au niveau des sections supérieures de la colonne. Aussi, une étude équivalente à celle réalisée au cours de ce stage sur d'autres plantes commercialisées par l'entreprise serait intéressante et permettrait d'envisager des associations de plantes optimales.

Bibliographie

- Al-Said, F., Hadley, P., Pearson, S., Khan, M., Iqbal, Q., (2018), Effect of high temperature and exposure duration on stem elongation of iceberg lettuce. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 55(1), 95-101.
- Aydin, M., Saglam, N., Gebologlu, N., Şahin, S., Yilmaz, E., Yucel, H., Mehmet, R., Karaman, S., (2013), The Role of Shading on Growth, Yield and Biochemical Composition of Crisp Lettuce in Soilless Culture, *Soil-Water Journal*, 2 (2), 1449-1454
- Aydin.M, Saglam.N, Gebologlu.N, Sahin.S, Yilmaz.E, Yucel.H, Kraman.R.M, (2013), The Role of Shading on Growth, Yield and Biochemical Composition of Crisp Lettuce in Soilless Culture, *Soil-water Journal*, 2, 1449-1455
- Ba, A., Aubry, C. (2011). Diversité et durabilité de l'agriculture urbaine: une nécessaire adaptation des concepts? *Noréis Environnement, aménagement, société*, 221, 11-24.
- Calvete, E. O., Nienow, A. A., Wesp, C. L., Cestonaro, L., Mariani, F., Fioreze, I., Cecchetti, D., Castilhos, T. (2007). Hydroponic strawberry production in vertical columns system under protected cultivation. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 29, 524-529
- Carlen, C., Potel, A.M., Ançay, A., (2009), Photosynthetic response of strawberry leaves to changing temperatures, *Acta Horticulturae*, 838 (11), 73-76
- Caruso, G., Villari, G., Melchionna, G., & Conti, S. (2011). Effects of cultural cycles and nutrient solutions on plant growth, yield and fruit quality of alpine strawberry (*Fragaria vesca* L.) grown in hydroponics. *Scientia Horticulturae*, 129(3), 479–485.
- CEREMA et de Exp'AU (2019). Agriculture urbaine dans les écoquartiers.
- Cervantes.L, Ariza.M.T, Gómez-Mora.A.J, Miranda.L, Medina.J.J, Soria.C, Martínez-Ferri.E, (2019), Light exposure affects fruit quality in different strawberry cultivars under field conditions, *ScientiaHorticultrae*, 252, 291-297.
- Chen, Z., Han, Y., Ning, K., Sing, Y., Zhao, W., Yan, S., Luo, C., Jiang, X., Ge, D., Liu, R., Wang, Q., Zhang, X., (2018), Inflorescence Development and the Role of LsFT in Regulating Bolting in Lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 8, 2248
- Daniel A. C. (2013). Aperçu de l'agriculture urbaine, en Europe et en Amérique du nord. *Rapport de Recherche Chaire Ecoconception des espaces bâtis*, 68 p.
- Fallovo, C., Rouphael, Y., Cardarelli, M., Rea, E., Battistelli, A., Colla, G., (2009), Yield and quality of leafy lettuce in response to nutrient solution composition and growing season. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 7(2), 456–462.
- Fleury, A. (2005). L'agriculture dans la planification de l'Ile-de-France: du vide urbain à la multifonctionnalité territoriale. *Les Cahiers de la multifonctionnalité, multifonctionnalité de l'agriculture périurbaine, vers une agriculture du projet urbain*, 8, 33-46.
- Fu, W., Li, P., Wu, Y., (2012), Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in lettuce. *Scientia Horticulturae*, 135, 45–51

- Fu, Y., Li, H., Yu, J., Liu, H, Cao, Z., Manukovsky, N., Liu, H., (2017), Interaction effects of light intensity and nitrogen concentration on growth, photosynthetic characteristics and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. youmaicai). *Scientia Horticulturae*, 214, 51-57
- Kang, W., Park, J., Park, K., Son, J., (2016), Leaf photosynthetic rate, growth, and morphology of lettuce under different fractions of red, blue, and green light from light-emitting diodes (LEDs). *Horticulture, Environment and Biotechnology*, 57(6), 573-579.
- Lakhia I. A., Jianmin G., Syed T. N., Chandio F. A, Buttar N. A., Qureshi W. A. (2018) Monitoring and Control Systems in Agriculture Using Intelligent Sensor Techniques: A Review of the Aeroponic System, *Journal of Sensors*, 2018, 18 p.
- Lee, R., Bhandari, S., Lee, G., Lee, J., (2019), Optimization of temperature and light, and cultivar selection for the production of high-quality head lettuce in a closed-type plant factory. *Horticulture, Environment and Biotechnology*, 60(2), 207-2016
- Lee.Y.H, Yoon.C.S, Park.N.I,Yeoung.Y.R, (2015), Influence of various nutrient concentrations on the growth and yield of summer strawberry cultivars cultivated in a hydroponic system, *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 56, 421-426.
- Liu, W., Chen, D.K., Liu, Z.X. (2005). High efficiency of column culture system in China, *Acta Horticulturae*, 691, 495-500.
- Liu.F, Savić.S, Jensen.C.R, Shahnazari.A, Jacobsen.S.E, Stikić.R, Andersen.M.N, (2006), Water relations and yield of lysimeter-grown strawberries under limited irrigation, *ScientiaHorticulturae*, 111, 128-132.
- Ma, X., Tang, Y., Li, M., Wang, Y., The effect of temperature and light on strawberry production in a solar greenhouse (2020), *Solar Energy*, 195, 318-328.
- Mandizdivdza.C.T, (2017), Influence of nutrient and light management on postharvest quality of lettuce (*Lactuca Sativa* L.) in soilless production systems, Thèse, Stillebosch University
- Massa.G, Graham.T, Haire.T, Flemming.C, Newsham.G, Wheeler.R, (2015), Light-emitting Diode Light Transmission through Leaf Tissue of Seven Different Crops », *HortScience*, 50, 501-506
- McCree, K.J. (1971). The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 9, 191-216.
- Moustier, P., Baye, A. M., De Bob, H., Guérin, H., Pages, J. (1999). Agriculture péri-urbaine en Afrique subsaharienne. Actes de l'Atelier International 20-24 avril 1998.
- Nielsen, S., (2010), « Food analysis, 4th edition », p.221, Springer
- Palencia, P., Martínez, F., Medina, J. J., & López-Medina, J. (2013). Strawberry yield efficiency and its correlation with temperature and solar radiation. *Horticultura Brasileira*, 31(1), 93–99.
- Paz, M., Fisher, P., Gómez, C., (2019), Minimum Light Requirements for Indoor Gardening of Lettuce. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*, 10 p.

- Ramírez-Gómez.H, Sandoval-Villa.M, Carillo-Salazar.A,Muratalla-Lúa, (2012), Comparison of Hydroponic Systems in the Strawberry Production, *Acta Horticulturae*, 947,165-172.
- Snowden, M., Cope, K., Bugbee, B., (2016), Sensitivity of Seven Diverse Species to Blue and Green Light: Interactions with Photon Flux. *PLoS ONE*, 11(10)
- Spalholz.H, Perkins-Veazie.P, Hernández.R, (2020), Impact of sun-simulated white light and varied blue:red spectrums on the growth, morphology, development, and phytochemical content of green and red-leaf lettuce at different growth stages. *Scientia Horticulturae*, 264, 109-121.
- Sublett, W., Barickman, C., Sams, C., (2018), Effects of Elevated Temperature and Potassium on Biomass and Quality of Dark Red ‘Lollo Rosso’ Lettuce. *Horticulturae*, 4(2), 11.
- Taghavi, T., Siddiqui, R., Rutto, L., (2019), The Effect of Preharvest Factors on Fruit and Nutritional Quality in Strawberry, *Strawberry - Pre- and post-harvest management techniques for higher fruit quality*, 22 p.
- Thimijan, R., Heins, R. (1983). Photometric, radiometric, and quantum light units of measure a review of procedures for interconversion. *HortScience*, 18, 818–822.
- Thomaier, S., Specht, K., Henckel, D., Dierich, A., Siebert, R., Freisinger, U. B., Sawicka, M. (2014). Farming in and on urban buildings : Present practice and specific novelties of Zero-Acreage Farming (ZFarming). *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30(01), 43–54.
- Torres, A. P., Lopez, R. G. (2011). Photosynthetic daily light integral during propagation of *Tecoma stans* influences seedling rooting and growth. *HortScience*, 46, 282-286.
- Tosti.G, Benincasa.P, Cortona.R, Falcinelli.B, Farneselli.M, Guiducci.M,Onofri.A, Pannacci.E, Tei.F, Giulietti.M, (2018), Growing lettuce under multispectral light-emitting diodes lamps with adjustable light intensity. *Italian Journal of Agronomy*, 13, 57-62
- Touliatos D., Dodd I. C., McAinsh M. (2016). Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics, *Food Energy Security* 5(3), 184–191.
- Velasco-López, F., Martínez-Gutiérrez, G.A, Morales, I., Vasquez-López, A., Escamirosa-Tinoco, C. (2020). Photosynthetically active radiation in strawberry produced in stair-like containers. *Horticultura Brasileira*, 38(1), 5-11.
- Wegmuller, F., Duchemin, E. (2010). Multifonctionnalité de l’agriculture urbaine à Montréal: étude des discours au sein du programme des jardins communautaires. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 10(2)
- Zhong, P., Yang, S., Qiao, R., Wang, T., (2011) Effect of Light Intensity on Main Quality of Strawberry, *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 1982.
- Zhou.J, Li.P, Fu.W, Wang.JZ, (2019), Growth, photosynthesis, and nutrient uptake, at different light intensities, and temperatures in lettuce, *HortScience*, 54(11), 1925-1933

ANNEXES

ANNEXE 1 : Résultats statistiques des Salades « Gotham »

Rendement salades « GOTHAMS » (pf = poids frais)

```
> durbinWatsonTest(MODgotham_pf)
lag Autocorrelation D-W Statistic p-value
1 -0.003235532 1.984974 0.096
Alternative hypothesis: rho != 0
> shapiro.test(residuals(MODgotham_pf))

Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(MODgotham_pf)
W = 0.98921, p-value = 0.6368

> bartlett.test(residuals(MODgotham_pf)~interaction(gotham$sectio,gotham$orientation))

Bartlett test of homogeneity of variances

data: residuals(MODgotham_pf) by interaction(gotham$sectio, gotham$orientation)
Bartlett's K-squared = 16.677, df = 15, p-value = 0.3386
```

→ Conditions d'utilisation de l'ANOVA vérifiée

```
> Anova(MODgotham_pf)
Anova Table (Type II tests)

Response: pf
              Sum Sq Df F value    Pr(>F)
section      63399   3  24.5794 2.47e-11 ***
orientation   4525   3   1.7542  0.1628
section:orientation 4302   9   0.5559  0.8288
Residuals    67923  79
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
' '

> TukeyHSD(MODgotham_pf,conf.level=.95)
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = pf ~ section * orientation, data = gotham)

$section
      diff      lwr      upr    p adj
2-1 -41.824275 -64.28019 -19.368363 0.0000307
3-1 -61.282609 -83.73852 -38.826696 0.0000000
4-1 -65.574275 -88.03019 -43.118363 0.0000000
3-2 -19.458333 -41.67407   2.757402 0.1070009
4-2 -23.750000 -45.96574  -1.534265 0.0314415
4-3  -4.291667 -26.50740  17.924069 0.9571908
```

Volume salades « GOTHAMS » (vol = volume)

```
> shapiro.test(residuals(MODgotham_vol))

      Shapiro-Wilk normality test

data:  residuals(MODgotham_vol)
W = 0.98974, p-value = 0.6781

> bartlett.test(residuals(MODgotham_vol)~interaction(gotham$sectio,gotham$orientation))

      Bartlett test of homogeneity of variances

data:  residuals(MODgotham_vol) by interaction(gotham$sectio, gotham$orientation)
Bartlett's K-squared = 23.821, df = 15, p-value = 0.06819

> durbinWatsonTest(MODgotham_vol)
lag Autocorrelation D-W Statistic p-value
1 -0.2676039 2.526322 0.276
Alternative hypothesis: rho != 0
```

→ Conditions d'utilisation de l'ANOVA vérifiée

```
> Anova(MODgotham_vol)
Anova Table (Type II tests)

Response: volume
              Sum Sq Df F value Pr(>F)
section      705239547  3 58.7966 <2e-16 ***
orientation   13991940  3  1.1665 0.3279
section:orientation 21232766  9  0.5901 0.8015
Residuals     315856760 79
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> TukeyHSD(MODgotham_vol,conf.level=.95)
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = volume ~ section * orientation, data = gotham)

$section
      diff      lwr      upr      p adj
2-1 -3634.634 -5165.964 -2103.3038 0.0000001
3-1 -6029.634 -7560.964 -4498.3038 0.0000000
4-1 -7186.759 -8718.089 -5655.4288 0.0000000
3-2 -2395.000 -3909.952 -880.0481 0.0004769
4-2 -3552.125 -5067.077 -2037.1731 0.0000002
4-3 -1157.125 -2672.077  357.8269 0.1950142
```

Pommaison salades « GOTHAMS » (POM = Pommaison)

```
> chisq.test(POMgotham_ori)
```

```
Pearson's Chi-squared test
```

```
data: POMgotham_ori  
X-squared = 1.9337, df = 3, p-value = 0.5863
```

➔ Pas de différences significatives selon l'orientation

```
> chisq.test(POMgotham_sec)
```

```
Pearson's Chi-squared test
```

```
data: POMgotham_sec  
X-squared = 18.575, df = 3, p-value = 0.0003347
```

➔ Différences significatives selon la section

```
> chisq.test(POMgotham_sec)$residuals
```

```
      pom      non_pom  
1  2.0422758 -1.8571498  
2  0.9517319 -0.8654603  
3 -0.8686949  0.7899504  
4 -2.0823127  1.8935575
```

Les facteurs ayant des valeurs au-dessus de 1,5 et en dessous de -1,5 indiquent que les salades sont sur ou sous-représentées.

```
> chisq.test(POMgotham)
```

```
Pearson's Chi-squared test
```

```
data: POMgotham  
X-squared = 27.864, df = 15, p-value = 0.02244
```

```
Warning message:
```

```
In chisq.test(POMgotham) :  
  l'approximation du Chi-2 est peut-être incorrecte
```

```
> chisq.test(POMgotham)$residuals
```

```
      pom      non_pom  
1N  1.1545239 -1.0498699  
1O  0.7792704 -0.7086320  
1S  1.3860793 -1.2604355  
1E  0.7792704 -0.7086320  
2N -0.4343474  0.3949752  
2O  0.1724615 -0.1568284  
2S  1.3860793 -1.2604355  
2E  0.7792704 -0.7086320  
3N -1.6479653  1.4985823  
3O -0.4343474  0.3949752  
3S  0.1724615 -0.1568284  
3E  0.1724615 -0.1568284  
4N -1.0411563  0.9467788  
4O -1.6479653  1.4985823  
4S -1.0411563  0.9467788  
4E -0.4343474  0.3949752
```

```
Warning message:
```

```
In chisq.test(POMgotham) :  
  l'approximation du Chi-2 est peut-être incorrecte
```

Etiolement salades « GOTHAM » (etio = élongations)

```
> chisq.test(gotham_etio_sec)

        Pearson's Chi-squared test

data:  gotham_etio_sec
X-squared = 34.065, df = 6, p-value = 6.536e-06

Warning message:
In chisq.test(gotham_etio_sec) :
  l'approximation du Chi-2 est peut-être incorrecte
> chisq.test(gotham_etio_sec)$residuals
      etio_1      etio_2      etio_3
1  3.707390  2.8864679 -1.7946208
2 -1.244342 -0.4407045  0.4586116
3 -1.191367 -1.1913668  0.6484979
4 -1.244342 -1.2443420  0.6773340
Warning message:
In chisq.test(gotham_etio_sec) :
  l'approximation du Chi-2 est peut-être incorrecte
, |
```

➔ Différences significatives selon la section

```
> chisq.test(gotham_etio_ori)

        Pearson's Chi-squared test

data:  gotham_etio_ori
X-squared = 4.0717, df = 6, p-value = 0.667

Warning message:
In chisq.test(gotham_etio_ori) :
  l'approximation du Chi-2 est peut-être incorrecte
,
```

➔ Pas de différence selon l'orientation

ANNEXE 2 : Résultats statistiques des Salades « Rougette »

Rendement salades « ROUGETTES » (pf = poids fais)

```
> shapiro.test(residuals(MODrougette_pf))
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: residuals(MODrougette_pf)
W = 0.92102, p-value = 3.671e-05
```

```
> bartlett.test(residuals(MODrougette_pf)~interaction(rougette$section,rougette$orientation))
```

Bartlett test of homogeneity of variances

```
data: residuals(MODrougette_pf) by interaction(rougette$section, rougette$orientation)
Bartlett's K-squared = 26.931, df = 15, p-value = 0.0293
```

```
> durbinWatsonTest(MODrougette_pf)
lag Autocorrelation D-W Statistic p-value
1 -0.03136519 1.918966 0.296
Alternative hypothesis: rho != 0
```

➔ Conditions non validées ➔ test non-paramétrique

```
> kruskal.test(pf~section,data=rougette)
```

Kruskal-Wallis rank sum test

```
data: pf by section
Kruskal-Wallis chi-squared = 43.761, df = 3, p-value = 1.696e-09
```

```
> kruskal.test(pf~orientation,data=rougette)
```

Kruskal-Wallis rank sum test

```
data: pf by orientation
Kruskal-Wallis chi-squared = 11.403, df = 3, p-value = 0.009737
```

```
> kruskal.test(pf~ interaction(orientation,section),data=rougette)
```

Kruskal-Wallis rank sum test

```
data: pf by interaction(orientation, section)
Kruskal-Wallis chi-squared = 61.723, df = 15, p-value = 1.272e-07
```

➔ Différences significatives selon section, orientation, section x orientation


```
> dunnTest(rougette$pf, rougette$orientation, method="bh")
Dunn (1964) Kruskal-Wallis multiple comparison
p-values adjusted with the Benjamini-Hochberg method.
```

	Comparison	Z	P.unadj	P.adj
1	E - N	2.8639244	0.004184279	0.02510567
2	E - O	2.6184084	0.008834100	0.02650230
3	N - O	-0.3057173	0.759819898	0.75981990
4	E - S	0.9262351	0.354323837	0.42518860
5	N - S	-1.9883306	0.046775139	0.09355028
6	O - S	-1.7198822	0.085453865	0.12818080

```
> dunnTest(rougette$pf, rougette$section, method="bh")
Dunn (1964) Kruskal-Wallis multiple comparison
p-values adjusted with the Benjamini-Hochberg method.
```

	Comparison	Z	P.unadj	P.adj
1	1 - 2	3.058228	2.226503e-03	3.339755e-03
2	1 - 3	4.749442	2.039784e-06	6.119351e-06
3	2 - 3	1.586819	1.125537e-01	1.125537e-01
4	1 - 4	6.291980	3.134416e-10	1.880649e-09
5	2 - 4	3.203796	1.356286e-03	2.712572e-03
6	3 - 4	1.703583	8.845903e-02	1.061508e-01

Volume salades « Rougettes » vol = Volume)

```
> shapiro.test(residuals(MODrougette_vol))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: residuals(MODrougette_vol)
W = 0.93031, p-value = 0.0001127
```

➔ Conditions non validées ➔ test non-paramétrique

```
> kruskal.test(volume~ interaction(orientation,section),data=rougette)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: volume by interaction(orientation, section)
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 36.713, df = 15, p-value = 0.001394
```

```
> kruskal.test(volume~ section,data=rougette)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: volume by section
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 19.91, df = 3, p-value = 0.0001772
```

```
> kruskal.test(volume~ orientation,data=rougette)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: volume by orientation
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 7.0149, df = 3, p-value = 0.07142
```

➔ Différence significative sauf sur l'orientation

```
> dunnTest(rougette$volume, rougette$section, method="bh")
```

```
Dunn (1964) Kruskal-Wallis multiple comparison
```

```
p-values adjusted with the Benjamini-Hochberg method.
```

	Comparison	Z	P.unadj	P.adj
1	1 - 2	2.2796792	2.262672e-02	4.525345e-02
2	1 - 3	2.8583076	4.259073e-03	1.277722e-02
3	2 - 3	0.5158008	6.059935e-01	6.059935e-01
4	1 - 4	4.3804310	1.184448e-05	7.106688e-05
5	2 - 4	2.0847903	3.708834e-02	5.563251e-02
6	3 - 4	1.6190435	1.054379e-01	1.265255e-01

```
Warning message:
```

```
'g' variable was coerced to a factor.
```

Pommaison « Rougettes » (POM = Pommaison)

```
> chisq.test(POMrougette_ori)
```

```
Pearson's Chi-squared test
```

```
data: POMrougette_ori
```

```
X-squared = 12.064, df = 3, p-value = 0.007166
```

```
> chisq.test(POMrougette_ori)$residuals
```

	pom	non_pom
E	-0.1217693	0.08328002
N	-1.8138382	1.24051405
O	0.2475975	-0.16933603
S	1.5735113	-1.07615053

➔ Nord sous représenté ; Sud sur représenté

```
> chisq.test(POMrougette_sec)
```

```
Pearson's Chi-squared test
```

```
data: POMrougette_sec
```

```
X-squared = 6.4597, df = 3, p-value = 0.09126
```

➔ Pas de différences significatives selon section

```
> chisq.test(POMrougette)
```

```
Pearson's Chi-squared test
```

```
data: POMrougette
```

```
X-squared = 14.575, df = 15, p-value = 0.4825
```

```
Warning message:
```

```
In chisq.test(POMrougette) :
```

```
l'approximation du Chi-2 est peut-être incorrecte
```

Etiolement « Rougettes » (etio = elongation)

```
> chisq.test(rougette_etio_sec)

        Pearson's Chi-squared test

data:  rougette_etio_sec
X-squared = 14.011, df = 6, p-value = 0.02951

Warning message:
In chisq.test(rougette_etio_sec) :
  1'approximation du Chi-2 est peut-être incorrecte
> chisq.test(rougette_etio_sec)$residuals
      etio_1      etio_2      etio_3
1  1.9896855  1.4708710 -1.5707450
2 -1.3907070 -0.9217648  1.0360125
3 -0.7640998  0.1961161  0.1603356
4  0.1132277 -0.8386279  0.4473985
Warning message:
In chisq.test(rougette_etio_sec) :
  1'approximation du Chi-2 est peut-être incorrecte
\ |
```

➔ Différences significatives selon section

```
> chisq.test(rougette_etio_ori)

        Pearson's Chi-squared test

data:  rougette_etio_ori
X-squared = 5.6997, df = 6, p-value = 0.4577

Warning message:
In chisq.test(rougette_etio_ori) :
  1'approximation du Chi-2 est peut-être incorrecte
```

➔ Pas de différences significatives selon section

ANNEXE 3 : Résultats statistiques des Fraises

Rendement commercialisable fraises (pf = poids frais)

```
> Aovpfcom <- aov(pf.com ~ orientation * section, data = fraisesphoto2)
shapiro.test(residuals(Aovpfcom))
Shapiro-Wilk normality test
data: residuals(Aovpfcom)
W = 0.9811, p-value = 0.2152
bartlett.test(residuals(Aovpfcom) ~ interaction(orientation, section), data = fraisesphoto2)
Bartlett test of homogeneity of variances
data: residuals(Aovpfcom) by interaction(orientation, section)
Bartlett's K-squared = 29.672, df = 15, p-value = 0.01316
durbinWatsonTest(Aovpfcom)
lag Autocorrelation D-W Statistic p-value
1 -0.05753654 2.11449 0.286
Alternative hypothesis: rho != 0
```

```
-----
Aovpfcomsec <- aov(pf.com ~ section, data = fraisesphoto2)
> shapiro.test(residuals(Aovpfcomsec))
Shapiro-Wilk normality test
data: residuals(Aovpfcomsec)
W = 0.98583, p-value = 0.4392
> bartlett.test(residuals(Aovpfcomsec) ~ section, data = fraisesphoto2)
Bartlett test of homogeneity of variances
data: residuals(Aovpfcomsec) by section
Bartlett's K-squared = 19.91, df = 3, p-value = 0.0001772
```

```
-----
Aovpfcomor <- aov(pf.com ~ orientation, data = fraisesphoto2)
> shapiro.test(residuals(Aovpfcomor))
Shapiro-Wilk normality test
data: residuals(Aovpfcomor)
W = 0.9413, p-value = 0.0005051
> bartlett.test(residuals(Aovpfcomor) ~ orientation, data = fraisesphoto2)
Bartlett test of homogeneity of variances
data: residuals(Aovpfcomor) by orientation
Bartlett's K-squared = 0.98743, df = 3, p-value = 0.8043
```

```
-----
kruskal_test(pf.com ~ orientation, data = fraisesphoto2)
# A tibble: 1 x 6
  .y.      n statistic    df      p method
* <chr> <int>    <dbl> <int> <dbl> <chr>
1 pf.com    90     4.89     3 0.18 Kruskal-Wallis
```

```
kruskal_test(pf.com ~ section, data = fraisesphoto2)
# A tibble: 1 x 6
  .y.      n statistic    df      p method
* <chr> <int>    <dbl> <int> <dbl> <chr>
1 pf.com    90    18.2     3 0.000398 Kruskal-Wallis
> dunn_test(fraisesphoto2, pf.com ~ section, "bonferroni")
# A tibble: 6 x 9
```

	.y.	group1	group2	n1	n2	statistic	p	p.adj
	p.adj.signif							
*	<chr>	<chr>	<chr>	<int>	<int>	<dbl>	<dbl>	<dbl>
	<chr>							
1	pf.com	1	2	22	23	0.0228		
	0.982	1	ns					
2	pf.com	1	3	22	22	-		
	2.46	0.0137	0.0824	ns				
3	pf.com	1	4	22	23	-3.37	0.000751	0.00451
	**							
4	pf.com	2	3	23	22	-		
	2.51	0.0119	0.0716	ns				
5	pf.com	2	4	23	23	-3.43	0.000600	0.00360
	**							
6	pf.com	3	4	22	23	-0.879	0.379	1 ns

```
kruskal_test(pf.com
~interaction(orientation,section),data=fraisesphoto2)
```

```
# A tibble: 1 x 6
  .y.      n statistic    df      p method
* <chr> <int>      <dbl> <int> <dbl> <chr>
1 pf.com   90      28.1    15 0.0209 Kruskal-Wallis
dunn_test(fraisesphoto2, pf.com~position,"bonferroni")
→ pas d'effet de l'interaction (orientation,section)
```

Taux de sucre des fraises :

```
Aovsucre<-aov(sucre ~ orientation*section,data=fraisesquali)
> shapiro.test(residuals(Aovsucre))
Shapiro-Wilk normality test
data: residuals(Aovsucre)
W = 0.9534, p-value = 0.03505
Aovsucre<-aov(sucre ~ orientation*section,data=fraisesquali)
shapiro.test(residuals(Aovsucre))
bartlett.test(residuals(Aovsucre)~interaction(orientation,section),dat
a=fraisesquali)
Bartlett test of homogeneity of variances
data: residuals(Aovsucre) by interaction(orientation, section)
Bartlett's K-squared = 19.892, df = 15, p-value = 0.1761
durbinWatsonTest(Aovsucre)
lag Autocorrelation D-W Statistic p-value
1 -0.07827066 2.120917 0.664
Alternative hypothesis: rho != 0
-----
Aovsucresec<-aov(sucre ~ section,data=fraisesquali)
> shapiro.test(residuals(Aovsucresec))
Shapiro-Wilk normality test
data: residuals(Aovsucresec)
W = 0.97532, p-value = 0.3264
bartlett.test(residuals(Aovsucresec)~section,data=fraisesquali)
Bartlett test of homogeneity of variances
data: residuals(Aovsucresec) by section
Bartlett's K-squared = 3.2301, df = 3, p-value = 0.3575
→ non paramétrique
```

```
-----
Aovsucreor<-aov(sucre ~ orientation,data=fraisesquali)
> shapiro.test(residuals(Aovsucreor))
  Shapiro-Wilk normality test
data:  residuals(Aovsucreor)
W = 0.98921, p-value = 0.9071
> bartlett.test(residuals(Aovsucreor)~orientation,data=fraisesquali)
  Bartlett test of homogeneity of variances
data:  residuals(Aovsucreor) by orientation
Bartlett's K-squared = 1.6679, df = 3, p-value = 0.6441
```

→ non paramétrique

```
-----
kruskal_test(sucre ~ orientation,data=fraisesquali)
# A tibble: 1 x 6
  .y.      n statistic    df      p method
* <chr> <int>      <dbl> <int>  <dbl> <chr>
1 sucre    54      6.69     3 0.0824
```

```
> kruskal_test(sucre ~ section,data=fraisesquali)
# A tibble: 1 x 6
  .y.      n statistic    df      p method
* <chr> <int>      <dbl> <int>  <dbl> <chr>
1 sucre    54      9.98     3 0.0187 Kruskal-Wallis
```

```
> kruskal_test(sucre
~interaction(orientation,section),data=fraisesquali)
# A tibble: 1 x 6
  .y.      n statistic    df      p method
* <chr> <int>      <dbl> <int>  <dbl> <chr>
1 sucre    54      29.6    15 0.0133 Kruskal-Wallis
```

```
dunn_test(fraisesquali, sucre~section,"bonferroni")
# A tibble: 6 x 9
  .y.  group1 group2    n1    n2 statistic      p  p.adj
p.adj.signif
* <chr> <chr>  <chr>  <int> <int>      <dbl>  <dbl>  <dbl>
<chr>
1 sucre 1      2      14    15    -
1.83  0.0666  0.400  ns
2 sucre 1      3      14    13   -2.69  0.00715 0.0429
*
3 sucre 1      4      14    12   -2.73  0.00634 0.0380
*
4 sucre 2      3      15    13    -
0.935 0.350  1      ns
5 sucre 2      4      15    12    -
1.01  0.311  1      ns
6 sucre 3      4      13    12   -0.0946 0.925  1      ns
```

```
dunn_test(fraisesquali, sucre~position,"bonferroni")
→ pas d'effet de l'interaction (orientation,section)
```

Taux d'acide des fraises

```
Aovacide<-aov(acide ~ orientation*section,data=fraisesquali)
> shapiro.test(residuals(Aovacide))
```

```

Shapiro-Wilk normality test
data: residuals(Aovacide)
W = 0.9764, p-value = 0.3617
bartlett.test(residuals(Aovacide)~interaction(orientation,section),data=fraisesquali)
Bartlett test of homogeneity of variances
data: residuals(Aovacide) by interaction(orientation, section)
Bartlett's K-squared = 16.41, df = 15, p-value = 0.3553
> durbinWatsonTest(Aovacide)
lag Autocorrelation D-W Statistic p-value
1 -0.05143409 2.078113 0.652
Alternative hypothesis: rho != 0
> kruskal_test(acide ~ orientation,data=fraisesquali)
# A tibble: 1 x 6
. y. n statistic df p method
* <chr> <int> <dbl> <int> <dbl> <chr>
1 acide 54 0.474 3 0.925 Kruskal-Wallis
> kruskal_test(acide ~ section,data=fraisesquali)
# A tibble: 1 x 6
. y. n statistic df p method
* <chr> <int> <dbl> <int> <dbl> <chr>
1 acide 54 3.42 3 0.331 Kruskal-Wallis
> kruskal_test(acide
~interaction(orientation,section),data=fraisesquali)
# A tibble: 1 x 6
. y. n statistic df p method
* <chr> <int> <dbl> <int> <dbl> <chr>
1 acide 54 11.1 15 0.745 Kruskal-Wallis

```


ANNEXE 4 : Tests de corrélation de Spearman

CORRELATIONS GOTHAM - Lumière

Volume vs lumière

coeff cor	0,647406165
n	90
t stat	7,968571364
p value	5,3722E-12

Rendement vs lumière

coeff cor	0,500519936
n	90
t stat	5,42353881
p value	5,07063E-07

Pommaison vs lumière

coeff cor	0,453203777
n	90
t stat	4,769346165
p value	7,27504E-06

Elongation vs lumière

coeff cor	-0,31663859
n	90
t stat	3,131458497
p value	0,002361468



CORRELATIONS ROUGETTES - Lumière

Volume vs lumiere

coeff cor	0,28937853
n	90
t stat	2,83594804
p value	0,00566855

Rendement vs lumière

coeff cor	0,47796738
n	90
t stat	5,10456048
p value	1,8967E-06

Pommaison vs lumière

coeff cor	0,38010808
n	90
t stat	3,85508454
p value	0,0002196

Élongation vs lumière

coeff cor	-0,11997687
n	90
t stat	1,1336717
p value	0,2600113

Pommaison vs elongation

coeff cor	-0,34539397
n	90
t stat	3,45256094
p value	0,00085568

CORRELATIONS Fraises - Lumière

Rendement vs lumière	
coeff cor	0,46082306
n	90
t stat	4,87092094
p value	4,8644E-06

Acide vs lumière	
coeff cor	0,09749708
n	54
t stat	0,70642699
p value	0,48307605

Sucre vs lumière	
coeff cor	0,37030446
n	55
t stat	2,90217123
p value	0,00538833

ANNEXE 5 : Résultats statistiques des intensités lumineuses

Ensoleillement de la colonne de fraises :

```
> shapiro_test( residuals(MOD.fraise) )
# A tibble: 1 x 3
  variable      statistic p.value
  <chr>          <dbl>    <dbl>
1 residuals(MOD.fraise) 0.856 6.99e-21
```

```
> kruskal.test(int_lum~interaction(section,orientation), data=tab_lux_
fraise)

Kruskal-wallis rank sum test

data:  int_lum by interaction(section, orientation)
Kruskal-wallis chi-squared = 105.15, df = 15, p-value = 1.366e-15

> kruskal.test(int_lum~orientation, data=tab_lux_fraise)

Kruskal-wallis rank sum test

data:  int_lum by orientation
Kruskal-wallis chi-squared = 23.9, df = 3, p-value = 2.621e-05

> kruskal.test(int_lum~section, data=tab_lux_fraise)

Kruskal-wallis rank sum test

data:  int_lum by section
Kruskal-wallis chi-squared = 72.612, df = 3, p-value =
1.177e-15
```

```
>dunnTest(tab_lux_fraise$int_lum,interaction(tab_lux_fraise$section,ta
b_lux_fraise$orientation), method = "bh")
1.N - 1.S -2.38454471 1.710027e-02 4.366026e-02
1.O - 1.S -2.51214577 1.199995e-02 3.348824e-02
1.S - 2.E 2.74696716 6.014916e-03 2.062257e-02
1.E - 2.N 4.48110094 7.425898e-06 8.911077e-05
1.N - 2.N 2.54936274 1.079200e-02 3.083428e-02
1.O - 2.N 2.42176169 1.544548e-02 4.029255e-02
1.S - 2.N 4.93390746 8.060064e-07 1.381725e-05
2.N - 2.O -2.73766291 6.187746e-03 2.062582e-02
2.N - 2.S -2.99242196 2.767734e-03 1.071381e-02
1.E - 3.E 3.85461520 1.159118e-04 6.954708e-04
1.S - 3.E 4.30742172 1.651685e-05 1.524632e-04
2.S - 3.E 2.36593623 1.798454e-02 4.496136e-02
1.E - 3.N 5.73185711 9.933694e-09 2.980108e-07
1.N - 3.N 3.80011892 1.446267e-04 8.264381e-04
1.O - 3.N 3.67251786 2.401724e-04 1.253073e-03
1.S - 3.N 6.18466363 6.223503e-10 3.734102e-08
2.E - 3.N 3.43769648 5.866849e-04 2.607489e-03
2.O - 3.N 3.98841909 6.651508e-05 4.434339e-04
2.S - 3.N 4.24317814 2.203764e-05 1.888940e-04
1.E - 3.O 3.07970463 2.072060e-03 8.288239e-03
1.S - 3.O 3.53251115 4.116329e-04 1.975838e-03
3.N - 3.O -2.65215248 7.998041e-03 2.399412e-02
1.E - 3.S 3.64238984 2.701186e-04 1.350593e-03
1.S - 3.S 4.09519636 4.218107e-05 3.374486e-04
1.E - 4.E 4.65389403 3.257242e-06 4.342990e-05
1.N - 4.E 2.72215584 6.485755e-03 2.048133e-02
1.O - 4.E 2.59455478 9.471352e-03 2.772103e-02
1.S - 4.E 5.10670055 3.278326e-07 6.556653e-06
2.E - 4.E 2.35973340 1.828807e-02 4.478712e-02
2.O - 4.E 2.91045601 3.609018e-03 1.312370e-02
2.S - 4.E 3.16521506 1.549684e-03 6.412484e-03
```

```

1.E - 4.N 5.80186047 6.558313e-09 2.623325e-07
1.N - 4.N 3.87012227 1.087808e-04 6.870365e-04
1.O - 4.N 3.74252122 1.821831e-04 9.937262e-04
1.S - 4.N 6.25466699 3.983650e-10 4.780380e-08
2.E - 4.N 3.50769983 4.519987e-04 2.086148e-03
2.O - 4.N 4.05842244 4.940534e-05 3.705400e-04
2.S - 4.N 4.31318149 1.609219e-05 1.609219e-04
3.O - 4.N 2.72215584 6.485755e-03 2.103488e-02
1.E - 4.O 4.72123903 2.344123e-06 3.516184e-05
1.N - 4.O 2.78950084 5.278936e-03 1.863154e-02
1.O - 4.O 2.66189979 7.770101e-03 2.390800e-02
1.S - 4.O 5.17404556 2.290789e-07 5.497894e-06
2.E - 4.O 2.42707840 1.522097e-02 4.058924e-02
2.N - 4.O 0.24013810 8.102232e-01 8.680963e-01
2.O - 4.O 2.97780101 2.903244e-03 1.088717e-02
2.S - 4.O 3.23256006 1.226863e-03 5.257986e-03
1.E - 4.S 3.98886215 6.639099e-05 4.686423e-04
1.S - 4.S 4.44166867 8.926394e-06 9.737884e-05
2.S - 4.S 2.50018317 1.241291e-02 3.385339e-02

```

```

> dunn_test_or-fraise(data=tab_lux_fraise, int_lum~orientation, p.adj
st.method = "BH")

```

orientation	orientation	p-adj	p.adj.signif
E	N	1.063026e-03	**
E	O	6.887695e-01	ns
E	S	3.427477e-01	ns
N	O	3.033935e-03	**
N	S	2.093328e-05	****
O	S	2.130348e-01	ns

```
> dunn_test_sec_fraise<- dunn_test(data=tab_lux_fraise, int_lum~section,
p.adjust.method = "BH")
```

orientation	orientation	p.adj	p.adj.signif
1	2	1.827494e-03	**
1	3	5.136956e-10	****
1	4	3.329549e-14	****
2	3	1.955265e-03	**
2	4	9.333434e-06	****
3	4	1.531065e-01	ns

Ensoleillement de la colonne de salades « Rougettes » :

```
> shapiro_test( residuals(MOD.rougette))
# A tibble: 1 x 3
  variable      statistic p.value
  <chr>          <dbl>    <dbl>
1 residuals(MOD.rougette) 0.848 1.29e-14
```

```
> #kruskal pour les rougettes:
> kruskal.test(int_lum~interaction(section,orientation), data=tab_lux_rougette)
```

Kruskal-wallis rank sum test

data: int_lum by interaction(section, orientation)
Kruskal-wallis chi-squared = 30.068, df = 15, p-value = 0.01168

```
> kruskal.test(int_lum~orientation, data=tab_lux_rougette)
```

Kruskal-wallis rank sum test

data: int_lum by orientation
Kruskal-wallis chi-squared = 11.67, df = 3, p-value = 0.008603

```
> kruskal.test(int_lum~section, data=tab_lux_rougette)
```

Kruskal-wallis rank sum test

data: int_lum by section
Kruskal-Wallis chi-squared = 22.997, df = 3, p-value =
4.044e-05

```
>dunnTest(tab_lux_rougette$int_lum,interaction(tab_lux_rougette$section,tab_lux_rougette$orientation), method = "bh")
1.0 - 4.E 3.617425041 0.0002975485 0.03570582
1.S - 4.E 3.434647113 0.0005933259 0.03559956

> dunn_test_or_roug<-dunn_test(data=tab_lux_rougette, int_lum~orientation, p.adjust.method = "BH")
```

orientation	orientation	p.adj	p.adj.sign
E	N	0.95648073	ns
E	O	0.03378392	*
E	S	0.03378392	*
N	O	0.03378392	*
N	S	0.03378392	*
O	S	0.95648073	ns

```
> dunn_test_sec_roug<-dunn_test(data=tab_lux_rougette, int_lum~section
, p.adjust.method = "BH")
```

section	section	p.adj	p.adj.sign
1	2	0.157842834	ns
1	3	0.022799686	*
1	4	0.001071187	**
2	3	0.294026539	ns
2	4	0.066742569	ns
3	4	0.294026539	ns

Ensoleillement de la colonne de salades « Gotham » :

```
> shapiro_test( residuals(MOD.gotham))
```

```
# A tibble: 1 x 3
```

variable	statistic	p.value
<chr>	<dbl>	<dbl>
1 residuals(MOD.gotham)	0.839	4.67e-15

```
> #kruskal pour les gothams:
```

```
> kruskal.test(int_lum~interaction(section,orientation), data=tab_lux_
gotham)
```

Kruskal-wallis rank sum test

data: int_lum by interaction(section, orientation)

Kruskal-wallis chi-squared = 37.237, df = 15, p-value = 0.001168

```
> kruskal.test(int_lum~orientation, data=tab_lux_gotham)
```

Kruskal-wallis rank sum test

data: int_lum by orientation

Kruskal-wallis chi-squared = 6.1346, df = 3, p-value = 0.1052

```
> kruskal.test(int_lum~section, data=tab_lux_gotham)
```

Kruskal-wallis rank sum test

data: int_lum by section

Kruskal-wallis chi-squared = 26.49, df = 3, p-value = 7.532e-06

```
>dunnTest(tab_lux_gotham$int_lum,interaction(tab_lux_gotham$section,ta
b_lux_gotham$orientation), method = "bh")
1.S - 3.E 3.07568870 0.0021001699 0.04200340
1.E - 4.N 3.36366468 0.0007691493 0.02307448
1.S - 4.N 3.65164067 0.0002605703 0.01563422
2.E - 4.N 2.95208257 0.0031563852 0.04208514
2.S - 4.N 2.99284629 0.0027638891 0.04145834
1.E - 4.O 3.46623147 0.0005278087 0.02111235
1.S - 4.O 3.75420745 0.0001738908 0.02086690
2.E - 4.O 3.05464936 0.0022532379 0.03862694
2.S - 4.O 3.09541308 0.0019653897 0.04716935
```

```
> dunn_test_sec_goth<-dunn_test(data=tab_lux_gotham, int_lum~section,
p.adjust.method = "BH")
```

section	section	p.adj	p.adj.sign
1	2	2.750900e-01	ns
1	3	4.246881e-03	**
1	4	1.326082e-05	****
2	3	7.138935e-02	ns
2	4	8.122831e-04	***
3	4	1.161060e-01	ns

ANNEXE 6 : Graphiques et tableaux de résultats

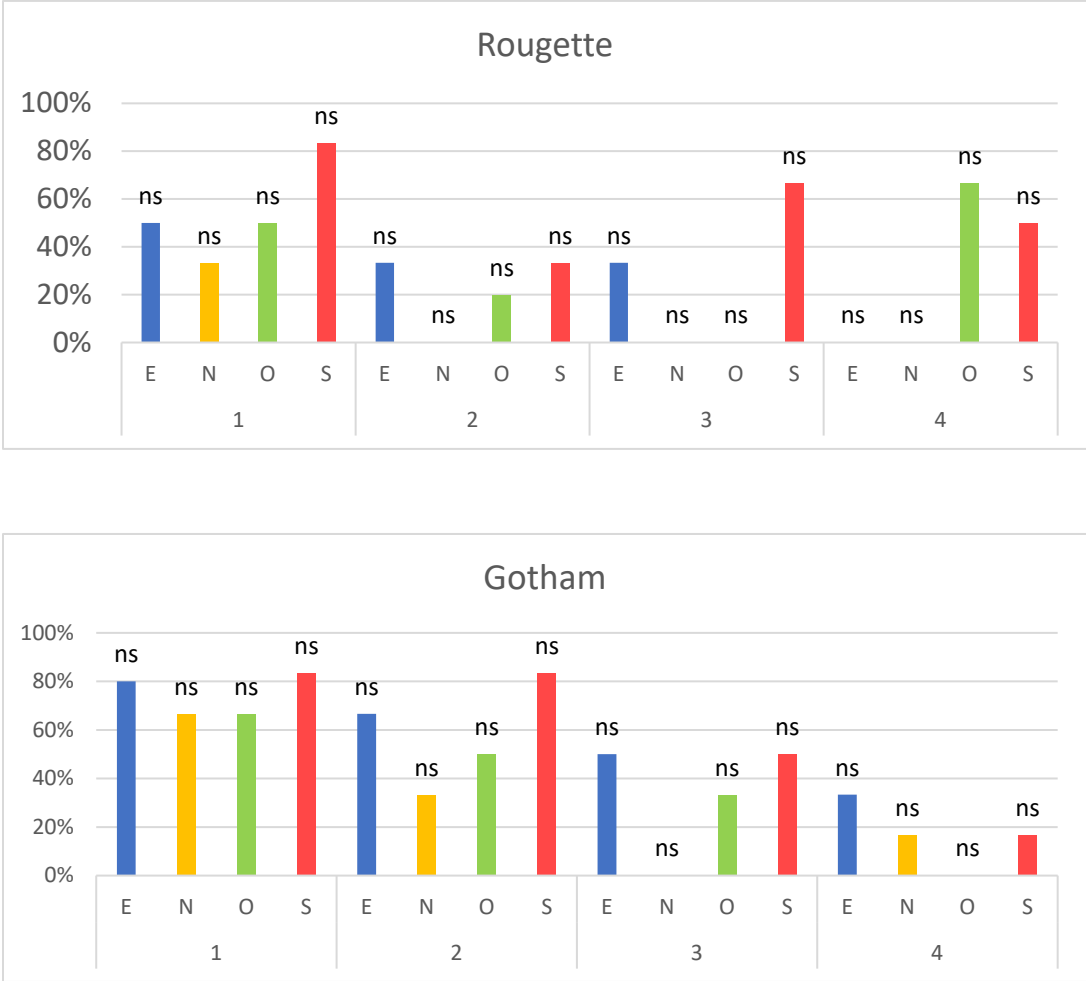


Figure 1 : Pourcentage de salades pommées (variété « Rougette » et « Gotham ») selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative selon le test du Chi².

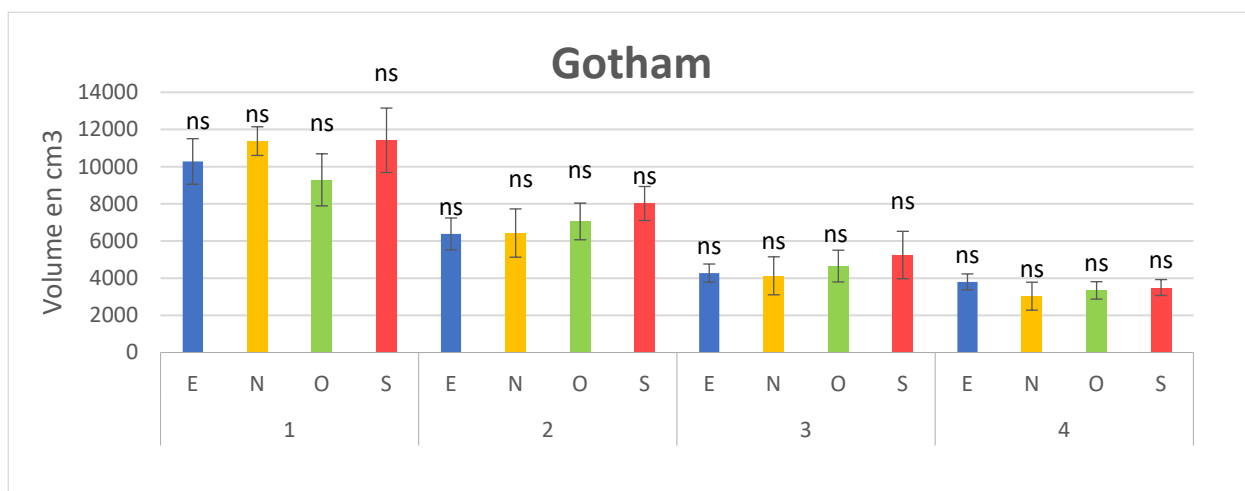
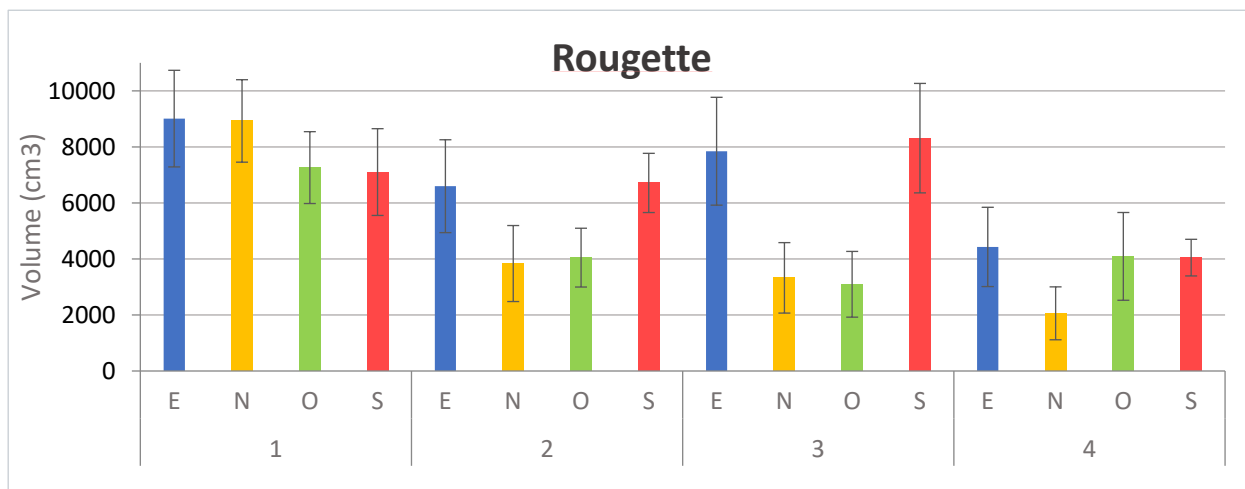


Figure 2: Volume moyen d'une salade « Gotham » et « Rougette » selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud et 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Le volume est exprimé en cm³. La barre verticale représente l'écart-type. La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative selon le test de Tukey.

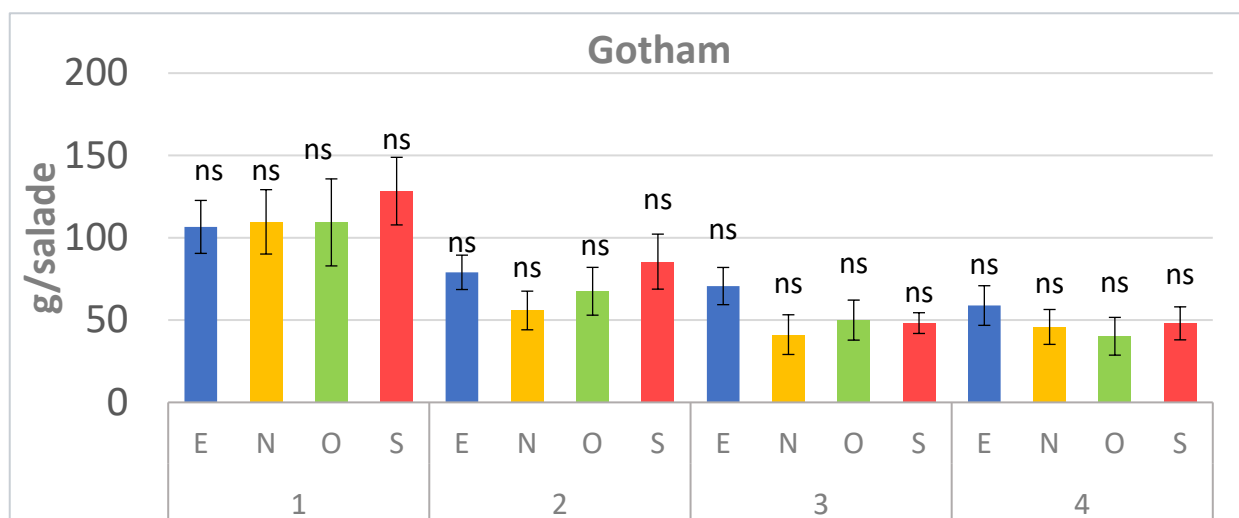
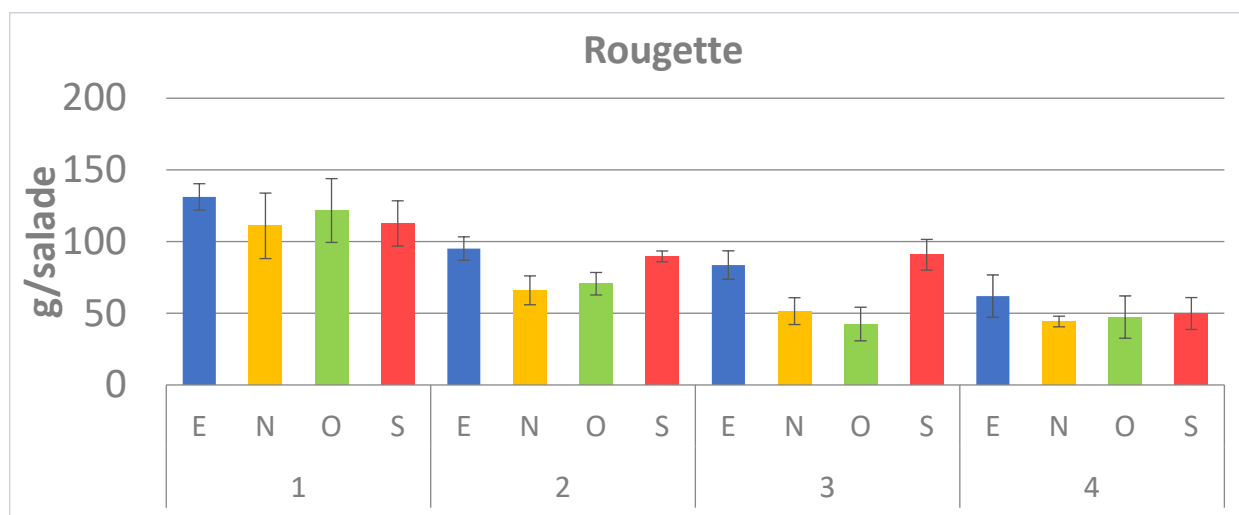


Figure 3: Rendement moyen d'une salade « Gotham » et « Rougette » selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud ; 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Le rendement est exprimé en g/salade. La barre verticale représente l'écart-type. La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative selon le test de Tukey.

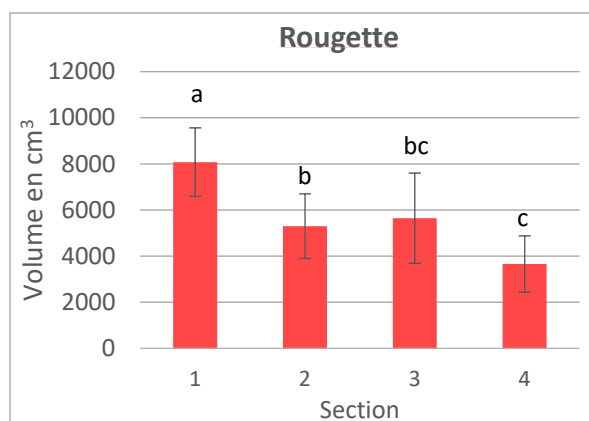
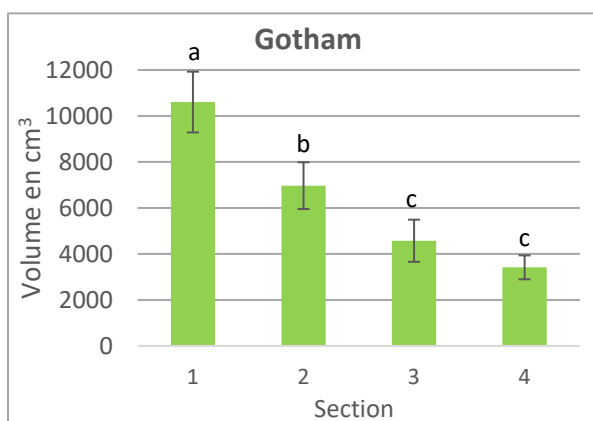


Figure 4 : Volume moyen d'une salade « Gotham » et « Rougette » selon leurs orientations et leurs sections (O = Ouest, E = Est, N = Nord, S = Sud ; 1 = section 1, 2 = section 2, 3 = section 3, 4 = section 4). Le volume est exprimé en cm³. Les lettres a, b, c indiquent les différences significatives selon les test Tukey et Dunn au seuil p -value ≤ 0.05 . La mention « ns » indique qu'il n'y a pas de différence significative. La barre verticale représente l'écart-type.

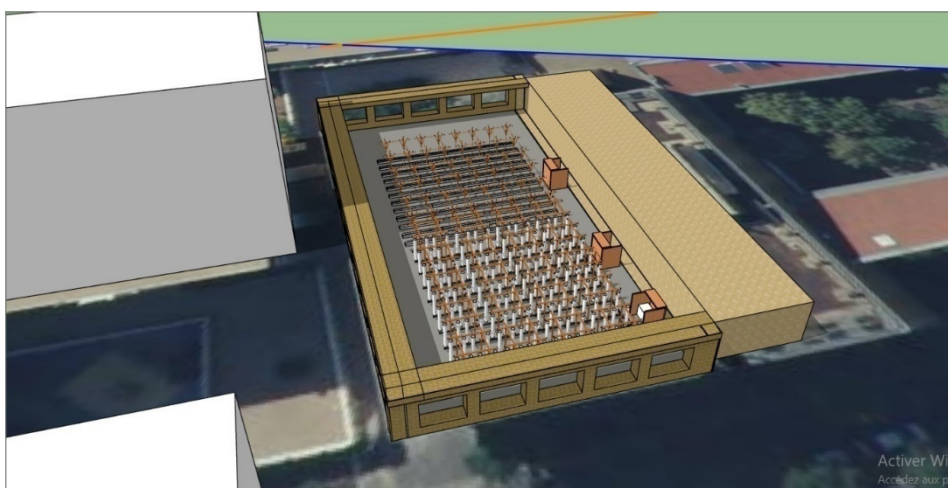
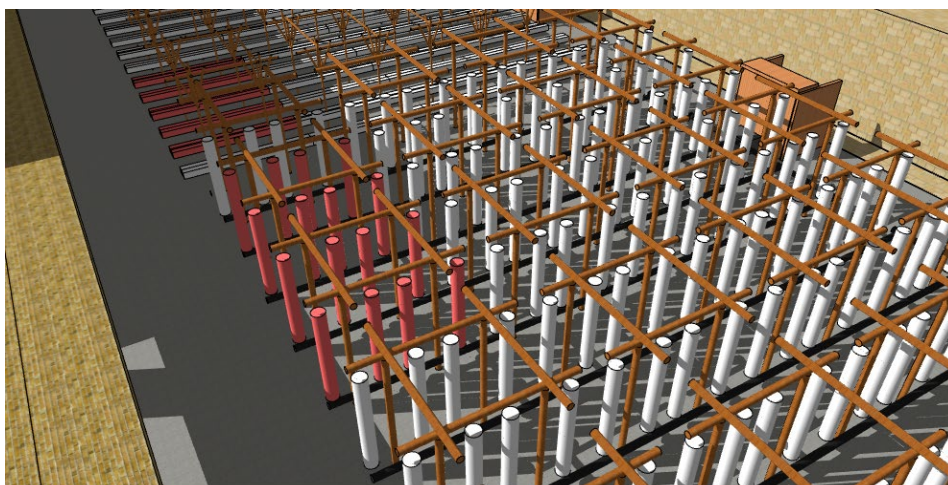
Tableau 1 : Effectifs de salades « Gotham » pour chaque niveau d'élongation selon la section et l'orientation (0 = pas d'élongation, 1=collet bombé, 2 = tige apparente, 3 = plus d'1cm de tige apparente). ** = effectif significativement plus grand pour chaque niveau d'élongation, * = effectif significativement plus faible pour chaque niveau d'élongation

Gotham Orientation	Section	Note d'étiollement			
		0	1	2	3
Est	1	-	1	1	3
	2	-	-	-	6
	3	-	-	-	6
	4	-	-	-	6
Nord	1	-	2	-	4
	2	-	-	-	6
	3	-	-	-	6
	4	-	-	-	6
Ouest	1	-	2	2	2
	2	-	-	-	6
	3	-	-	-	6
	4	-	-	-	6
Sud	1	-	1	2	3
	2	-	-	1	5
	3	-	-	-	6
	4	-	-	-	6

Tableau 2: Effectifs de salades « Rougette » pour chaque niveau d'élongation selon la section et l'orientation (0 = pas d'élongation, 1=collet bombé, 2 = tige apparente, 3 = plus d'1cm de tige apparente). ** = effectif significativement plus grand pour chaque niveau d'élongation, * = effectif significativement plus faible pour chaque niveau d'élongation

Rougettes Orientation	Section	Note d'étiollement			
		0	1	2	3
Est	1	-	1	2	3
	2	-	-	2	4
	3	-	-	3	3
	4	-	-	1	4
Nord	1	-	2	1	3
	2	-	-		5
	3	-	-	1	5
	4	-	1	1	2
Ouest	1	-	2	3	1
	2	-	-		5
	3	-	-	2	4
	4	-	1	1	4
Sud	1	-	-	3	3
	2	-	-	1	5
	3	-	1	-	5
	4	-	-	-	6

ANNEXE 7 : Vue 3D du site Cours des Lions sur le logiciel Sketchup.



Annexe 8 : Protocole de titrage de l'acidité totale inspiré de Nielsen et al ; 2010.

Protocole:

1. Faire un jus de fruits avec l'intégralité des échantillons voulus
2. Passer le jus au travers d'un filtre
3. Prélever 10ml de jus (Si possible.) et versé dans un récipient (Au mieux un bécher de 250ml)
4. Ajouter 50 ml d'eau distillé
5. Ajouter 3 gouttes de Phénolphthaléine
6. Mettre la solution titrante de NaOH (0,1 Mol/L) dans une burette
7. Laisser la solution couler jusqu'à ce que la solution devienne rose foncé pendant 30 secondes au moins
8. Noter le volume de NaOH versé.
9. Utiliser la formule suivante pour calculer la concentration en acide de l'échantillon :

$$\% \text{acid} = 0,1 \times \text{Volume NaOH (L)} \times \text{acid factor} / \text{Volume de jus (L)} \times 10$$

On choisit comme acide factor celui de l'acide citrique qui est dominant dans le jus de fraises ; (Acide factor = 0.064)

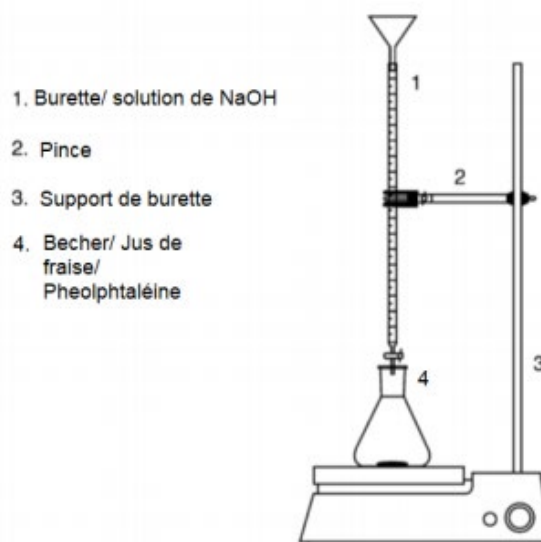
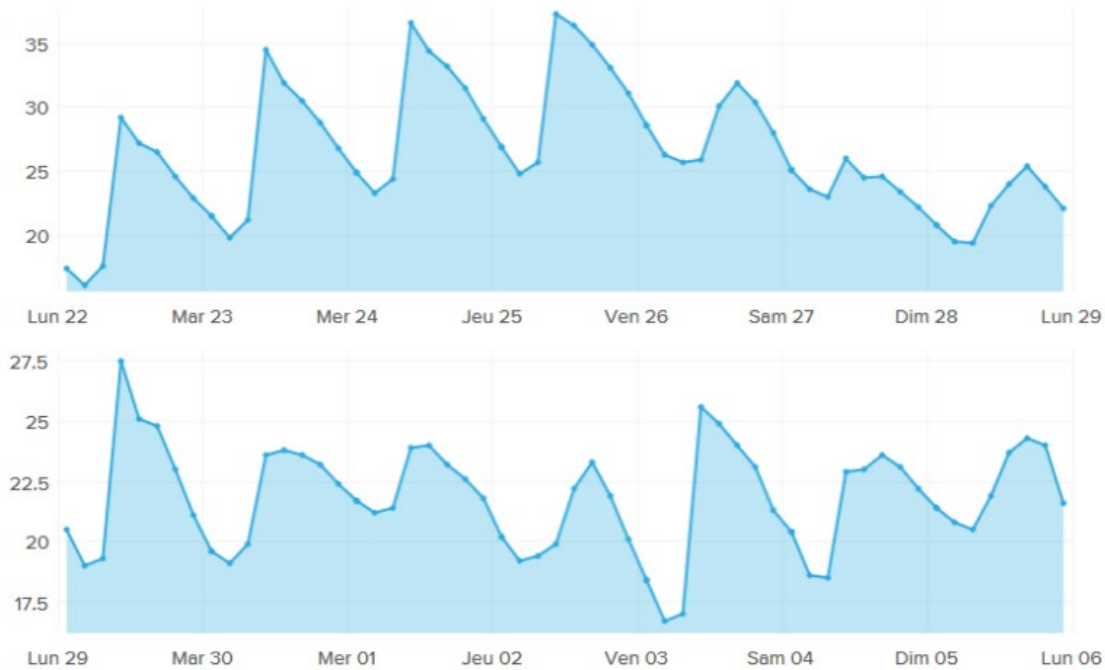


Figure 5: Schéma du dispositif de titration par colorimétrie. (d'après Nielsen. et al : , 2010, « Food analysis, 4th edition »)

Annexe 9: Courbe de température



Courbe de température sur les deux dernières semaines de croissance des « Gothams » et « Rougettes » (Du lundi 22 Juin au Jeudi 04 Juillet.).

Abstract

Agropolis is a productive urban farm based in Paris. The company installs, operates or rents above-ground rooftop farms. The production systems are horizontal hydroponic gutters and vertical aeroponic towers.

The company has noted a heterogeneous yield and quality from plants grown in towers. A Research and Development program was conducted during the summer 2020 to optimize its column production systems. The heterogeneities observed are potentially linked to uneven plant light exposure.

This report therefore focuses on the study of strawberry plants and salads productivity and quality according to their height and orientation on an aeroponic column. The results were then related to the sun exposure profile of each tower.

This study revealed that height had a greater impact than orientation on the salads and strawberries quality and productivity. Light intensity measurements indicated that the average tower light exposure also decreased with height, however a weak correlation with yield and quality was found.

This study did not show a direct relation between plant development and light exposure, however, an extensive study of the potential factors that have a bigger influence, or that interact with light should be conducted.

Keywords: Urban Agriculture, Vertical Farming, Aeroponic Production, Rooftop Farming, Light Exposure

Résumé

Agripolis est une structure d'agriculture urbaine à but productif basée à Paris. L'entreprise installe, exploite et/ou loue des fermes maraîchères hors-sol sur les toits. La production se fait en plein air en gouttières hydroponiques horizontales et également en colonnes aéropoiques verticales.

L'entreprise ayant constaté une hétérogénéité de rendement et de qualité des plantes cultivées en colonnes, un programme de Recherche et Développement a été mené au cours de l'été 2020 afin d'optimiser ses systèmes de production en colonne notamment. Les hétérogénéités observées sont potentiellement liées à un ensoleillement inégal des plantes.

Ce mémoire porte donc sur l'étude de la productivité et la qualité de fraisiers et salades selon leurs hauteur et orientation sur une colonne aéropoique. Les résultats obtenus ont ensuite été mis en lien avec le profil d'ensoleillement de chaque colonne de culture.

Cette étude a montré que la hauteur avait un impact significatif plus important que l'orientation sur les critères de qualité et de productivité des salades et des fraises. Les mesures d'intensité lumineuse ont démontré que l'ensoleillement moyen des colonnes diminuait également avec la hauteur, cependant une corrélation faible avec le rendement et la qualité a été constatée.

Cette étude n'a pas permis de mettre en évidence un lien direct entre le développement des plantes et l'ensoleillement, cependant une étude plus approfondie des potentiels facteurs plus influents, ou interagissant avec la lumière serait à mener.

Mots Clés : Agriculture urbaine, Agriculture verticale, Culture aéropoique, Agriculture sur toit, Exposition lumineuse