

AgroParisTech
22 place de l'Agronomie
CS 20040
91 123 Palaiseau Cedex



AGROOF SCOP
424 Route d'Anduze
30140 Boisset-et-Gaujac



ÉVALUATION DES PERFORMANCES AGRONOMIQUES DE LA CULTURE DE LA POMME DE TERRE (*SOLANUM TUBEROSUM*) EN AGROFORESTERIE MARAÎCHÈRE EN CLIMAT MÉDITERRANÉEN



Mémoire de fin d'études
Soutenance le 19 septembre 2024

Stage de 3^e année, effectué du 04/03/2024 au 02/09/2024

Référente pédagogique : MÉDIÈNE Safia
Maître de stage : BÉRAL Camille

VERSTRAETE Cloé
Étudiante de 3^e année en PISTv
Option CIGALES

Engagement de non plagiat

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.

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.

Sanction : En cas de manquement à ces consignes, le département dont vous dépendez, 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.

Engagement :

Je soussigné (e) Cloé Verstraete
Reconnais avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Anduze le 4 septembre 2024
Signature :



AUTORISATION DE MISE EN LIGNE

Je soussigné.e :

Mme, M..... Verstraete Cloé
(nom patronymique, prénom)

.....
(nom d'usage)

né.e le 12/07/1999 à Paris 14e

rédacteur du mémoire intitulé:

" Evaluation des performances agronomiques de la culture de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) en agroforesterie maraîchère en climat méditerranéen.
..... "

rédigé dans le cadre de la formation :

3e année à AgroParisTech, dans le cadre de la spécialisation PISTv, pour l'option CIGALES

Le stage s'étant déroulé dans l'organisme d'accueil :

..SCOP.AGROOF.....
.....

Situé

...424 route d'Anduze.....
(n° et nom de la voie)

30140 Boisset-et-Gaujac.....
(code postal, Ville, Pays)

agissant en l'absence de toute contrainte et parfaitement conscient que ma seule obligation réside dans le dépôt de mes travaux, **autorise**, si la diffusion est également autorisée par le chef d'établissement, après avis du tuteur et dans le respect des conventions en cours, **la mise en ligne de mes travaux dans les conditions suivantes** :

- La mise en ligne peut être effectuée par AgroParisTech ou toute nouvelle structure qui pourrait s'y substituer.
- La mise en ligne est autorisée sur intranet ou internet. Elle implique le respect par l'étudiant de prescriptions techniques minimales fournies par AgroParisTech.
- Le texte sera diffusé en version intégrale. Une notice bibliographique pourra cependant être établie.
- En cas de période de confidentialité définie, AgroParisTech s'engage à ne diffuser le texte déposé qu'une fois la période de confidentialité passée.
- La présente autorisation ne saurait être source de responsabilité de l'établissement AgroParisTech sur le contenu de l'œuvre dont l'auteur demeure seul responsable.
- La présente autorisation emporte renonciation à toute rémunération pour la diffusion effectuée dans les conditions ici prévues.
- La présente autorisation n'emporte pas obligation pour l'établissement AgroParisTech à la mise en ligne.
- Dans le cas d'un dépôt en ligne (portail des bibliothèques infodoc et/ou DUMAS), dans le cadre du RGPD, AgroParisTech se réserve le droit de retirer du mémoire tout élément comportant des données personnelles et n'ayant pas fait l'objet d'une autorisation spécifique.
- L'auteur choisit parmi les licences libres Creative Commons la manière dont il veut diffuser son travail.

Rayer les mentions inutiles :

CC-BY (attribution),
CC-BY-SA (attribution, partage dans les mêmes conditions),
CC-BY-ND (attribution, pas de modification),
CC-BY-NC (attribution, pas d'utilisation commerciale),
CC-BY-NC-SA (attribution, pas d'utilisation commerciale, partage dans les mêmes conditions),
CC-BY-NC-ND (attribution, pas d'utilisation commerciale, pas de modification).

Si l'auteur omet de choisir une licence, AgroParisTech se réserve le droit d'apposer la licence Creative Commons : CC-BY-NC-ND (attribution, pas d'utilisation commerciale, pas de modification)

- La présente autorisation est consentie sans limitation de temps.
- L'auteur peut retirer l'autorisation de diffusion sur le portail des bibliothèques Infodoc à tout moment, à charge pour lui d'en aviser le responsable de la bibliothèque du campus dans lequel le mémoire a été produit par lettre recommandée. L'œuvre sera alors retirée dans les meilleurs délais.
- **Le dépôt dans la base DUMAS ne peut pas faire l'objet d'une demande de retrait une fois celui-ci validé**

L'étudiant autorise une mise en ligne :

☒ Oui

☐ Non

Pour l'étudiant :

Fait à Anduze le 04/09/2024

Signature de l'étudiant



PARTIE A REMPLIR PAR LE REPRÉSENTANT DU JURY

Le travail est confidentiel :

☐ Non

☐ Oui

Si oui, la diffusion est autorisée :

☐ Au terme d'une période d'embargo (date de fin d'embargo à préciser (JJ/MM/AAAA) :/...../.....)

☐ Jamais (à éviter si possible)

La diffusion par le portail des bibliothèques (Infodoc) ou tout outil venant s'y substituer est autorisée pour un mémoire qui n'est pas ou plus confidentiel dans les conditions suivantes :

☐ PDF téléchargeable sans authentification

☐ PDF consultable en lecture seule sans authentification

☐ PDF téléchargeable après authentification du lecteur (réservé à AgroParisTech)

☐ PDF consultable uniquement après authentification du lecteur (réservé à AgroParisTech)

La diffusion par l'archive ouverte DUMAS est autorisée pour un mémoire qui n'est pas ou plus confidentiel dans les conditions suivantes :

☐ PDF dans DUMAS (cf. contraintes qualitatives) téléchargeable sans authentification

Pour le jury de soutenance :

Fait à le

Signature du représentant du jury

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu ma maîtresse de stage, Camille Béral, pour sa confiance et son soutien au cours de ce stage. Son expertise, sa rigueur et son regard scientifiques m'ont été d'une grande aide et ont élargi ma vision de la recherche. Ils m'ont éclairée et donné le recul nécessaire sur de nombreux points au cours de ce stage. Ta disponibilité en toutes conditions malgré la charge de travail et ton humour, toujours à point, m'ont permis de mener à bien ce stage. Merci pour ton aide tantôt sur le rapport, tantôt sur le terrain ou sur l'atelier « chips » de Roumassouze. C'est promis, je travaillerai assidument mon 2nd degré.

J'aimerais remercier Ambroise Martin-Chave, qui a su me conseiller et m'accompagner sur nombreuses de mes interrogations et réflexions. Merci pour ton savoir-faire et ta patience, mise à rude épreuve au vue du facteur question.jour-1.

Mes remerciements vont également à Lola Broyer, qui a encadré tout le début de mon stage et sans qui l'installation des sondes microclimatiques auraient été mise en grand danger. Merci pour tes conseils qui ont guidé mes premiers pas dans ce stage.

Je remercie également Safia Médiène, pour son apport scientifique, ses réflexions et son encadrement pédagogique tout au long de ce stage.

Je tiens tout particulièrement à remercier les maraîcher.es qui m'ont accueillie sur leurs exploitations respectives et sans qui cette étude n'aurait pas été possible : Hélène Ménager et Olivier Gavach des Terres de Roumassouze. Merci pour votre enthousiasme et votre motivation. J'ai beaucoup appris de votre vision du maraîchage. Merci à Nicolas Verzotti de la ferme du Colibri pour sa générosité et les discussions toujours enrichissantes. Merci à François WARLOP, Cécile Pérez et Anthony Volant du Grab ainsi qu'à l'équipe de la ferme de la Durette pour leur investissement dans le projet et leur précieuse aide sur le terrain.

Je tiens également à remercier toute l'équipe agroofienne, de m'avoir si bien accueillie au cours de ces 6 mois, qui ont filé. J'ai apprécié chaque instant passé à vos côtés, sur le terrain, autour d'un bon gaspacho de courgette, ou lors d'un concours de lancer de hache.

Un immense merci à toutes celles et ceux qui m'ont aidé sur les terrains ALMANAC et pour votre motivation à toute épreuve. Merci Hélène pour ta disponibilité et ta gentillesse. Merci Valentin, pour tes références culinaires (douteuses) et musicales (inégalées). Numa, pour ta précieuse aide sur le terrain, notamment en cas d'attaque de guêpes. Pierrick, ton esprit et ton ingéniosité nous ont évité de nombreuses heures de travail. Merci à Daniele, Fabien, pour votre humour et surtout merci à toutes et tous de m'avoir partagé vos différents projets, de la plantation à l'atelier de co-conception. Merci à Virginie, Rémy, Sébastien, pour votre présence et aide, tantôt en informatique, tantôt en administratif. Enfin j'aimerais remercier Daria, sans qui ce stage dans le Gard n'aurait pas la même saveur ainsi que mes co-stagiaires Sarah et Tom-Elie, qui m'ont accompagnée et épaulée tout au long de ce stage, au bureau, ou sur le terrain. L'enthousiasme et l'humour qui font l'aura de cette équipe ont rythmé mon stage et vont beaucoup me manquer.

J'aimerais pour finir remercier mes proches, notamment ma famille, qui n'a pas hésité, en vacances, à se lever à 5h du matin pour récolter des pommes de terre et qui m'a soutenue au cours de ces 6 mois. Merci à mes ami.es, du Gard et d'ailleurs, pour le soutien émotionnel et d'avoir rendu ce stage encore plus fou qu'il ne l'était.

Table des matières

.....	3
.....	4
REMERCIEMENTS.....	5
TABLE DES MATIÈRES.....	6
FIGURES	8
TABLEAUX.....	9
ANNEXES	10
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	11
I. INTRODUCTION	12
1. CONTEXTE	12
a) Bassin de production méditerranéen français	12
b) Changement climatique à l'échelle du bassin méditerranéen et impacts sur les cultures.....	12
c) Enjeux du maraîchage en région méditerranéenne.....	13
d) L'agroforesterie comme potentiel levier d'atténuation et d'adaptation au changement climatique	14
2. ÉTAT DE L'ART SUR LA POMME DE TERRE EN AGROFORESTERIE MARAÎCHÈRE.....	16
a) Culture de la pomme de terre (<i>Solanum tuberosum</i>).....	16
b) La pomme de terre en agroforesterie.....	17
c) Présentation du projet ALMANAC.....	20
II. MATÉRIEL ET MÉTHODES	22
1. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU SITE D'ÉTUDE.....	22
2. MATÉRIEL BIOLOGIQUE.....	22
3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	24
4. VARIABLES D'ÉTUDES.....	25
a) Caractérisation du microclimat.....	25
b) Croissance et développement de la pomme de terre.....	26
c) Production et qualité de la pomme de terre.....	26
5. PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE.....	27
6. MÉTHODES DE TRAITEMENT STATISTIQUES	28
III. RÉSULTATS.....	29
1. CARACTÉRISATION DU MICROCLIMAT.....	29
a) Rayonnements.....	29
b) Température et humidité relative.....	31
2. CROISSANCE ET DÉVELOPPEMENT.....	33
3. PRODUCTION ET QUALITÉ.....	37
IV. DISCUSSION	41
1. CARACTÉRISATION DU MICROCLIMAT.....	41
2. CROISSANCE ET DÉVELOPPEMENT DE LA POMME DE TERRE EN AGROFORESTERIE MARAÎCHÈRE.....	42
3. PERFORMANCES AGRONOMIQUES DE LA POMME DE TERRE EN AGROFORESTERIE MARAÎCHÈRE.....	44
V. PERSPECTIVES	47
CONCLUSION.....	49

BIBLIOGRAPHIE	50
ANNEXES.....	58
ABSTRACT	61
RÉSUMÉ.....	62

Figures

FIGURE 1. VUE SATELLITE DES TERRES DE ROUMASSOUZE ET DES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX DU SITE (GOOGLE EARTH).	22
FIGURE 2. VUE SATELLITE DES TROIS MODALITÉS (L, T, C) ÉTUDIÉES SUR LES PARCELLES EXPÉRIMENTALES À TERRES DE ROUMASSOUZE (GOOGLE EARTH).	23
FIGURE 3. PHOTOGRAPHIES DES PARCELLES L ET T AUX TERRES DE ROUMASSOUZE, MAI 2024.	23
FIGURE 4. SCHÉMA (PAS À L'ÉCHELLE) DU PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE DES SONDES MICROCLIMATIQUES ET DES PLACETTES AGRONOMIQUES AU SITE DES TERRES DE ROUMASSOUZE.	28
FIGURE 5. COURBES DE PAR ($\mu\text{MOL}/\text{M}^2$) JOURNALIER PAR RANG ET MODALITÉ. LA LIGNE VIOLETTE REPRÉSENTE L'INTENSITÉ LUMINEUSE DE SATURATION PHOTOSYNTHÉTIQUE.	29
FIGURE 6. CUMUL DE PAR ($\mu\text{MOL}/\text{M}^2$) SUR LA CAMPAGNE PAR MODALITÉ, RANG ET TRANSECT.	30
FIGURE 7. OUVERTURE DE CANOPÉE (%) PAR RANG ET PAR TRANSECT POUR CHAQUE MODALITÉ	30
FIGURE 8. ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE JOURNALIÈRE PAR MODALITÉ ET PAR MOIS. BARRES D'ERREUR = INTERVALLE DE CONFIANCE (95%).	31
FIGURE 9. ÉCARTS DE TEMPÉRATURE AU CONTROL ($^{\circ}\text{C}$) POUR LES MODALITÉS L ET T. BARRES D'ERREUR = INTERVALLE DE CONFIANCE (95%).	32
FIGURE 10. ÉCART D'HUMIDITÉ RELATIVE AU TÉMOIN POUR LES MODALITÉS T ET L (%). BARRES D'ERREUR = INTERVALLES DE CONFIANCE À 95%.	32
FIGURE 11. ÉVOLUTION DE LA HAUTEUR (CM) PAR MODALITÉ ET PAR DATE DE SUIVI. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD. ..	33
FIGURE 12. COURBES DE RÉGRESSION LINÉAIRE SIMPLE ENTRE LA HAUTEUR DES PLANTS (CM) ET LE GAIN DE PAR ($\mu\text{MOL}/\text{M}^2$) POUR LES 4 PÉRIODES DE SUIVIS DE LA CAMPAGNE 2024.	34
FIGURE 13. NDVI MOYEN PAR PLANT AU 13 JUIN 2024. TEST NON PARAMÉTRIQUE DE KRUSKAL-WALLIS, $\alpha = 5\%$, TEST POST HOC DE DUNN. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD.	34
FIGURE 14. COURBES DE NDVI AUX DIFFÉRENTES DATES DE SUIVIS PAR MODALITÉ. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD.	35
FIGURE 15. MASSE SURFACIQUE ($\text{G}\cdot\text{CM}^{-2}$) PAR MODALITÉ. ANOVA À 1 FACTEUR, $\alpha = 5\%$. TEST POST-HOC DE TUKEY. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD.	35
FIGURE 16. RÉGRESSION LINÉAIRE SIMPLE POUR LA MASSE SURFACIQUE (LMA) EN $\text{G}\cdot\text{CM}^{-2}$ EN FONCTION DE L'OUVERTURE DE LA CANOPÉE.	36
FIGURE 17. STADES PHÉNOLOGIQUES PAR MODALITÉ À CHAQUE DATE DE SUIVI. TEST NON PARAMÉTRIQUE DE KRUSKAL-WALLIS, $\alpha = 5\%$, TEST POST HOC DE DUNN. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD.	36
FIGURE 18. ÉCART (G) ENTRE LA PRODUCTION BRUTE MOYENNE ET LA PRODUCTION NETTE MOYENNE PAR RANG ET PAR MODALITÉ À LA RÉCOLTE (8 AOÛT 2024). TEST NON PARAMÉTRIQUE DE KRUSKAL-WALLIS, $\alpha = 5\%$, TEST POST HOC DE DUNN. LES BARRES D'ERREUR CORRESPONDENT À L'ERREUR STANDARD.	37
FIGURE 19. PRODUCTION BRUTE PAR UNITÉ D'EAU IRRIGUÉE (G/MM) PAR RANG POUR CHAQUE MODALITÉ. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD.	38
FIGURE 20. PROPORTIONS DES CLASSES DE CALIBRE PAR MODALITÉ À LA RÉCOLTE (1 ^E AOÛT 2024).	38
FIGURE 21. PROPORTIONS DES CLASSES DE COMMERCIALISATION (1 ET 2) PAR MODALITÉ À LA RÉCOLTE (1 ^E AOÛT 2024).	39
FIGURE 22. MATIÈRE SÈCHE (%) DES TUBERCULES LORS DE LA RÉCOLTE (1 ^E AOÛT 2024) EN FONCTION DES MODALITÉS. TEST ANOVA À 1 FACTEUR, $\alpha = 5\%$. TEST POST-HOC DE TUKEY. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD.	39
FIGURE 23. MATRICE DE CORRÉLATION DES VARIABLES DE PRODUCTION (À LA RÉCOLTE) ET DES VARIABLES DE CROISSANCE (AU 13 JUIN 2024).	40

Tableaux

TABLEAU 1. RÉCAPITULATIF DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	25
TABLEAU 2. RÉCAPITULATIF DES VARIABLES MESURÉES AU COURS DE L'ÉTUDE, DU PAS DE TEMPS ET PRESSION D'ÉCHANTILLONNAGE ASSOCIÉS.....	27
TABLEAU 3. TABLEAU RÉCAPITULATIF DE L'OUVERTURE DE CANOPÉE (%), DU CUMUL DE PAR ($\mu\text{MOL}/\text{M}^2$) ET DE L'IRRIGATION APPORTÉE PAR MODALITÉ. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD.	29
TABLEAU 4. RÉCAPITULATIF DES TEMPÉRATURES MOYENNES, DES AMPLITUDES JOURNALIÈRES DE TEMPÉRATURES ET DE L'HUMIDITÉ RELATIVE MOYENNE POUR CHAQUE MODALITÉ (MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD). TEST NON PARAMÉTRIQUE DE KRUSKAL-WALLIS, $\alpha = 5\%$	31
TABLEAU 5. RÉCAPITULATIF DES HAUTEURS MOYENNES (CM) PAR DATE DE SUIVI ET MODALITÉ (MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD) ET ÉCARTS DE HAUTEUR (%) AU CONTRÔLE POUR T ET L.	33
TABLEAU 6. RÉCAPITULATIF DES PRODUCTIONS BRUTE, NETTE (G) ET DU NOMBRE DE TUBERCULES BRUT ET NET. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD.	37

Annexes

ANNEXE 1. ÉVOLUTION DU PAR PAR RANG ET MODALITÉ AU COURS DE LA CAMPAGNE. BARRES D'ERREUR = INTERVALLE DE CONFIANCE (95%).	58
ANNEXE 2. NOMBRE DE TIGES MOYEN PAR PLANT AU 13 JUIN 2024. TEST NON PARAMÉTRIQUE DE KRUSKAL-WALLIS $\alpha = 5\%$. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD.	58
ANNEXE 3. POIDS MOYEN DE TUBERCULE PAR MODALITÉ. ANOVA À 1 FACTEUR, $\alpha = 5\%$. TEST POST-HOC DE TUKEY. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD.	59
ANNEXE 4. PRODUCTION BRUTE PAR UNITÉ D'IRRIGATION (g/mm) PAR MODALITÉ. ANOVA À 1 FACTEUR, $\alpha = 5\%$. TEST POST-HOC DE TUKEY. MOYENNES $\pm$ ERREUR STANDARD.	59

Sigles et abréviations

ALMANAC : Accompagner le Maraîchage Agroforestier par uNe Approche Collaborative

C : modalité Contrôle

ETP : EvapoTranspiration Potentielle

GA : Gibbérelline

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

ITAB : Institut Technique de l'Agriculture Biologique

L : modalité Élagué

LMA : Leaf Mass per Area

MedECC : Mediterranean Experts on Climate and environmental Change

MS : Matière Sèche

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

PAR : Photosynthetically Active Radiation

SAF : Système AgroForestier

Safer : Sociétés d'aménagement foncier et d'établissement rural

SAU : Surface Agricole Utile

T : modalité Têtard

I. INTRODUCTION

1. Contexte

a) Bassin de production méditerranéen français

La région méditerranéenne française s'étend des Pyrénées Orientales aux Alpes Maritimes, inclut l'Est de l'Occitanie et une partie de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Elle présente une grande diversité de paysages et d'écosystèmes (zones de plaines, de vallées et plateaux, de garrigues, montagneuses et littoral), marquée par un climat tout aussi variable. Ce dernier est caractérisé par des hivers humides et des étés chauds et secs (Köppen, 1900). Cette région est sujette à des événements climatiques extrêmes, tels que des inondations et crues, dues à des précipitations intenses et soudaines ainsi qu'à des épisodes de sécheresse (Michaelides et al., 2018). Cette variabilité dans le climat et les écosystèmes méditerranéens implique une aussi grande diversité dans la production agricole. La région Occitanie, qui s'étend des Pyrénées orientales aux Bouches-du-Rhône, est un important bassin de production méditerranéen. Cette région comporte à elle seule 12% de la SAU métropolitaine et est la première région agricole française par son nombre d'exploitations (Chambre Régionale d'Agriculture Occitanie et CERFRANCE Occitanie, 2023). La diversité de productions agricoles en Occitanie est notable et sa répartition s'explique en partie par les réseaux hydrographiques et le relief. Les plateaux et plaines de l'Est Occitan par exemple sont propices aux grandes cultures, à l'arboriculture et au maraîchage. De ce fait, d'après les chiffres du recensement agricole de 2020, l'Occitanie se positionne comme première région viticole française avec 33% des surfaces en viticulture de la métropole, 1ère région pour la production de légumes secs, 4e pour les légumes frais et 2e pour la production de fruits. L'Occitanie n'est pas en reste pour l'élevage et se positionne comme 1ère région française pour l'élevage ovin.

b) Changement climatique à l'échelle du bassin méditerranéen et impacts sur les cultures

La région Méditerranéenne est classée parmi l'un des principaux "hot-spots" du changement climatique (Giorgi, 2006), c'est à dire une région qui présenterait la réponse la plus sensible au forçage radiatif avec un réchauffement et un assèchement global. En effet, les récents rapports du GIEC (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023) et du MedECC (Mediterranean Experts on Climate and environmental Change, 2020), ont observé un réchauffement des températures (+1,5°C) accru dans le bassin méditerranéen, plus rapide que celui observé à l'échelle globale depuis la fin du 19e siècle. De plus, le régime des précipitations a une tendance à la baisse depuis les années 1950 (Caloiero et al., 2018). Ces constats climatiques ne s'arrêtent pas là et des études prévoient une accentuation de ces phénomènes d'ici la fin du 21e siècle. Selon les scénarios du GIEC, les températures pourraient augmenter jusqu'à 5,6°C d'ici 2100 notamment en période estivale et les vagues de chaleur augmenteront en sévérité et en fréquence. Ces projections indiquent également des épisodes de précipitations plus courts mais plus violents, s'accompagnant d'inondations plus fréquentes (Barrera-Escoda et al., 2014). D'autres études corroborent ces prédictions climatiques d'ici 2100 : une augmentation des températures, une diminution des précipitations, des épisodes de sécheresse plus longs et des épisodes de précipitations

extrêmes (Dubrovský et al., 2014; Giorgi & Lionello, 2008; Raymond et al., 2019; Zittis et al., 2019). Ce changement climatique a un impact direct sur l'Evapotranspiration Potentielle (ETP) dont l'augmentation de a été mesurée de 1970 à 2006 en période estivale dans la région méditerranéenne (Pyrénées-Orientales et Aude) (Chaouche et al., 2010). Par ailleurs, dans leur étude, Savé et al., 2012 montrent que selon les scénarios du GIEC, en climat méditerranéen, une augmentation des besoins en eau des cultures de 40 à 250% est attendue.

c) Enjeux du maraîchage en région méditerranéenne

Le maraîchage en région méditerranéenne souffre particulièrement de ce changement climatique, et une diminution de 45% du rendement pourrait être observée (Georgopoulou et al., 2017; Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023; Zhao et al., 2015). L'augmentation des températures et des concentrations en CO₂ atmosphérique affecte directement les mécanismes de photosynthèse et de respiration des cultures légumières (Bisbis et al., 2018), particulièrement quand les ressources en eau, lumière et nutriments n'augmentent pas. Or, comme mentionné précédemment, dans le contexte de changement climatique actuel, les précipitations se feront de plus en plus rares et plusieurs études ont démontré la vulnérabilité des cultures légumières à la sécheresse (Potop et al., 2012; Potopová et al., 2016). La production maraîchère devra donc faire face à de nouveaux enjeux, notamment concernant la gestion de la ressource en eau. Par ailleurs, le rallongement de la période de croissance via l'augmentation des températures annuelles, bien que bénéfique au premier abord, ne le serait réellement que s'il ne s'accompagne pas d'évènements climatiques extrêmes (Bisbis et al., 2018). Des températures hivernales plus douces pourraient également porter préjudice à la dormance de certaines cultures (College of Horticulture, Agricultural University of Hebei, Baoding, China et al., 2016). Enfin, le changement climatique favoriserait l'apparition précoce de ravageurs dans l'année ainsi que l'arrivée de nouvelles espèces dans l'hémisphère Nord, où les moyens de lutte (notamment en agriculture biologique) contre ces-dernières n'existent pas encore (Hullé et al., 2010). À ces nouveaux défis en maraîchage, s'ajoute la complexité de maîtriser sur une petite surface un grand nombre de cultures et autant d'itinéraires techniques différents, afin de répondre au mieux à la demande des consommateurs.

Les enjeux du maraîchage et notamment du maraîchage biologique sont donc multiples et ne sont pas tous d'un tenant agronomique. La pression foncière particulièrement est un frein à l'installation et au développement d'activités maraîchères en région Méditerranéenne. En Occitanie par exemple, d'après les chiffres de la Safer, les prix des terres agricoles ont augmenté de 3,4% en 2023 par rapport à 2022. L'artificialisation des sols ainsi que la concentration des terres n'aident pas les maraîchers à s'installer sur de petites surfaces dont le prix à l'hectare augmente. Par ailleurs, les résultats économiques dégagés en maraîchage permettent difficilement une certaine flexibilité financière. Les fluctuations des prix du marché, l'augmentation des coûts de production, ainsi que la baisse de la consommation de produits d'origine biologique depuis plusieurs années (baisse de 6% enregistrée entre 2022 et 2023 d'après l'Agence Bio, 2024) participent à l'instabilité économique de tels systèmes. Pour répondre à ces divers enjeux, la diversification de la production est un levier à explorer afin de lisser les variations de rendement et intensifier la production sur de petites surfaces (Paut et al., 2019, 2020). L'agroforesterie particulièrement, est une forme de diversification des systèmes agricoles.

d) L'agroforesterie comme potentiel levier d'atténuation et d'adaptation au changement climatique

L'agroforesterie dans l'Histoire

L'agroforesterie est l'association, sur une même surface, d'arbres et de productions agricoles (cultures et/ou élevage) (Liagre & Dupraz, 2019). Ce mode de production se pratique depuis l'Antiquité et il est encore possible de retrouver certains modèles traditionnels d'agroforesterie comme les pré-vergers par exemple. Ces systèmes datant du 16^e siècle, associent sur une pâture des arbres fruitiers et de l'élevage. L'élevage permet d'entretenir la prairie avant la récolte de fruits et de recycler l'azote. Les arbres eux, offrent une protection au bétail lors des chaleurs estivales et retardent le dessèchement estival de l'herbe prairial. Les prés-vergers sont donc des systèmes durables à bas coût de production qui permettent depuis des siècles d'associer des productions complémentaires entre elles. Dans le Dauphiné (Isère, Hautes-Alpes, Drôme), l'association de noyers et de cultures trouve ses racines durant l'Antiquité. Ce système permet d'allier la production de cultures, de noix et de bois d'œuvre hautement valorisé aujourd'hui sur le marché. La présence de cultures proches des noyers induit une poussée rapide vers le haut et de « tutorer » d'une certaine manière les arbres, qui arriveront plus rapidement à maturité de production et seront bien valorisables pour leur bois. Depuis la seconde moitié du 20^e siècle, les arbres ont progressivement été éliminés des paysages agricoles français, afin de permettre le remembrement du parcellaire, la mécanisation et l'intensification de la production (disparition annuelle de 20 000 km de haie ces dernières années (Ministère de l'agriculture, 2023)). L'arbre a longtemps été relégué au pourtour des parcelles, cantonné aux forêts et les cultures ont longtemps été dissociées des arbres. Toutefois, ces dernières années ont vu apparaître un regain d'intérêt pour l'arbre et sa place au sein des systèmes de production. Cela peut s'observer notamment au travers des différents dispositifs financés par le gouvernement qui soutiennent l'agroforesterie et son développement en France, comme le 1^{er} plan de développement de l'agroforesterie en 2015, la mesure « Plantons des haies ! » du plan de relance en 2020, et plus récemment, le « Pacte en faveur de la haie », en 2023 (Ministère de l'Agriculture, 2023).

Les potentiels services écosystémiques de l'agroforesterie

L'agroforesterie aurait plusieurs bénéfices et services écosystémiques, tant sur le plan de l'adaptation au changement climatique que son atténuation (Kandji & Verchot, 2006; Lasco et al., 2014; Ramachandran Nair et al., 2010; Reyes et al., 2021). Plusieurs études corroborent les multiples services potentiels de l'agroforesterie utiles aux cultures (Quandt et al., 2023) pouvant être à la fois biologiques, physiques et socio-économiques. Il est possible de distinguer des services dits de régulation, d'approvisionnement et culturels.

Dans la première classe de services de régulation, l'adaptation de la production agricole au changement climatique est considérée. Il est possible d'observer un effet des arbres sur le microclimat dans les systèmes agroforestiers (SAF) (Martin-Chave, 2018). En effet, plusieurs études montrent que l'ombrage des arbres générerait un effet tampon sur les températures et l'humidité ambiante. Des études ont prouvé que les arbres d'ombrage peuvent diminuer les températures extrêmes (jusqu'à 5°C en SAF dans Barradas & Fanjul, 1986) et lisser les variations extrêmes de microclimat (Beer et al., 1998; Gomes et al., 2020; Lin, 2007). Entre autres et comme mentionné précédemment, le facteur limitant pour les cultures dans le contexte de changement climatique actuel est l'eau. Or, plusieurs études ont montré que

l'ombrage des arbres diminuerait la transpiration des cultures (Lin, 2010) et la vitesse du vent (Böhm et al., 2014) en SAF, ce qui réduirait au global la demande évaporative du système. Par ailleurs, le réseau racinaire des arbres plus profond permettrait d'accéder à des ressources en eau non atteignables par les cultures et une complémentarité racinaire peut être observée (Cardinael, Mao, et al., 2015). Ce même réseau racinaire contribuerait à l'infiltration de l'eau dans le sol (Anderson et al., 2009; Cannavo et al., 2011) permettant un meilleur stockage de l'eau et réduisant par la même occasion l'érosion du sol (Y. Zhao et al., 2012). Ces constats donnent ainsi aux arbres un rôle de facilitation pour la ressource en eau dans le cas où la structure, la conduite du SAF et le choix des espèces est réfléchi en ce sens (Liagre & Dupraz, 2019). Dans un tel contexte de changement climatique global, l'agroforesterie pourrait donc permettre de maintenir la fonction de production de certaines terres agricoles vouées à l'assèchement (Cardinael et al., 2021; Gomes et al., 2020). L'association de plantes pérennes et annuelles offrirait également un habitat et des ressources (pollen, nectar) aux auxiliaires des cultures, favorisant ainsi la régulation biologique par conservation (Lasco et al., 2014; Ratnadass et al., 2012; Stamps & Linit, 1997) et la biodiversité fonctionnelle du sol (Chiffot et al., 2009; Martin-Chave, 2018). Enfin, les systèmes agroforestiers permettraient d'augmenter la fertilité du sol, notamment les stocks de carbone du sol (Cardinael, Chevallier, et al., 2015) et les nutriments N, P, K, Ca (Pardon et al., 2017). Ces résultats sont renforcés par des études montrant de meilleurs rendements à la surface en SAF comparé à la monoculture (Lovell et al., 2018; Sereke et al., 2015; Sollen-Norrlin et al., 2020).

Entre compétition et facilitation

Toutefois, les interactions au sein de ces systèmes diversifiés sont complexes et il est possible d'observer de la compétition pour certaines ressources. En effet, la présence d'arbres pourrait concurrencer les cultures pour l'eau, la lumière, l'azote, le carbone et autres nutriments du sol (Jose et al., 2004; Liagre & Dupraz, 2019). Jose (2000), par exemple, démontrent qu'en isolant les racines des espèces pérennes des autres, l'absorption d'eau du sol par les cultures annuelles est plus importante et les teneurs en eau du sol plus grandes que sur le rang d'arbres. Tian et al., (2017), montre que l'implantation de résineux en 6 x 3m pouvait réduire de 58% le rayonnement photosynthétiquement actif (compris entre 400 et 700 nm). Dans cette même étude, la teneur en eau du sol à 1,5 m des arbres était significativement plus faible qu'à 3 m des arbres. De nombreuses études se sont penchées sur le rôle de facilitation ou de compétition des arbres pour la ressource en eau, sans qu'un consensus puisse être atteint. Une complémentarité dans la zone d'approvisionnement racinaire pourrait résulter d'une plasticité en réponse adaptative à la compétition (Cardinael, Mao, et al., 2015). Cette compétition interspécifique peut parfois induire des diminutions de rendements pour les cultures associées, notamment sur les individus proches des rangs d'arbres. Dans Peng et al. (2009), un effet négatif sur la croissance et le rendement de cultures de maïs et soja associées à des noyers et des pruniers pourrait être attribué à la compétition pour la lumière et l'eau, particulièrement pour les individus situés à 1 m des arbres. A l'inverse, certaines études témoignent d'une complémentarité d'utilisation des ressources entre les arbres et les cultures (Blanchet et al., 2022) et d'une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau pour les cultures (Bai et al., 2016; Xiao et al., 2013). La multitude d'interactions entrant en jeu dans ces systèmes agroforestiers rend leur étude complexe et la littérature scientifique vient à manquer sur l'étude de ces systèmes, notamment dans les écosystèmes de l'hémisphère Nord (Quandt et al., 2023). Des efforts de recherche sont donc à fournir pour comprendre

dans quelles conditions et mesures les arbres ont un rôle de facilitation et l'agroforesterie permet de rendre les services recherchés. Ce travail de recherche fournirait ainsi des éléments de réflexions aux professionnels dans leur choix de conception et de gestion de ces SAF.

Agroforesterie maraîchère

Parmi les différents types de systèmes agroforestiers, on retrouve l'agroforesterie maraîchère, une forme d'agroforesterie en intra-parcellaire qui associe des cultures maraîchères et des arbres (fruitiers ou non) sur une même surface. Malgré un premier projet visant à étudier ces systèmes en région méditerranéenne (*Le Projet SMART*, 2016), peu de littérature scientifique porte sur l'agroforesterie maraîchère dans cette région. En particulier, la pomme de terre, 6^e culture la plus produite en France, interroge sur sa conduite en agroforesterie maraîchère et sur son adaptation à de telles conditions.

2. État de l'art sur la pomme de terre en agroforesterie maraîchère

a) Culture de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*)

La pomme de terre (*Solanum tuberosum*) est une espèce herbacée, de la famille des Solanacées, originaire d'Amérique Centrale et d'Amérique du Sud. En 2022, la production française s'élevait à plus de 8 millions de tonnes (FAOSTAT, 2024).

Cette espèce vivace peut repartir chaque année de ses tubercules, mais est cultivée en annuelle. Sa reproduction est donc souvent végétative, et se fait via les tubercules la plupart du temps, néanmoins, selon les variétés et les conditions, une floraison puis une fructification sont possibles. La pomme de terre est plantée en général au début du printemps, via un tubercule mère. Suite à cela, les plantes vont passer par différents stades clés, tels que l'émergence des tiges, l'élongation du plant, le développement foliaire, la floraison et la fructification (si elles ont lieu), puis la sénescence des feuilles. Les organes racinaires, en parallèle, développeront des racines et des stolons puis passeront par le stade de la tubérisation. La tubérisation se décompose en 2 phases : l'initiation de la tubérisation (formation des tubercules), et le développement des tubercules (grossissement des tubercules). L'initiation de la tubérisation se fait en général dans un court laps de temps, entre 1 et 2 semaines. Kolbe & Stephan-Beckmann, (1997) montrent dans leur étude que le nombre final de tubercules est atteint lorsque l'accumulation de biomasse aérienne commence à ralentir. Durant la floraison, la formation des tubercules est complète, et les sucres accumulés dans les organes photosynthétiquement actifs vont progressivement être transférés vers les tubercules, qui vont grossir en taille via l'accumulation d'amidon et d'eau. La tubérisation et la croissance sont des phénomènes dits antagonistes, pilotés par la production de gibbérellines (GAs) (De Lucas et al., 2008) : leur surproduction stimule la croissance et l'élongation cellulaire et inhibe la tubérisation. La synthèse de GAs est elle-même influencée par la photopériode et le rayonnement (García-Martínez & Gil, 2001; Jackson et al., 1996). Lorsque les assimilats ont été redistribués vers les organes reproductifs (tubercules), alors débute la phase de sénescence pour la partie aérienne. Selon les variétés et les conditions pédoclimatiques, un cycle de végétation peut durer entre 85 et 130 jours.

D'après l'ITAB, la pomme de terre est une culture très sensible au stress hydrique. Son système racinaire limite sa zone d'exploration aux 80 premiers cm du sol, et la majorité des prélèvements en eau se font entre 0 et 40 cm de profondeur. Selon les variétés et les conditions, un pied de pomme de terre consomme entre 4 et 5 mm d'eau par jour, soit 400 mm pour un cycle complet.

b) La pomme de terre en agroforesterie

Aussi, l'étude de la culture de pomme de terre en SAF soulève de nombreuses interrogations, notamment pour la compétition en eau et en lumière que peut induire la présence d'arbres. Pardon et al., 2018 observent une diminution des rendements pour la pomme de terre en SAF (haies et agroforesterie intra parcellaire) en climat tempéré plus forte pour les individus proches (2,5 m) des arbres. Ce rendement semble être d'autant plus réduit que les arbres sont âgés. Par ailleurs, les pommes de terre au plus proche des haies présentaient des critères de qualité amoindris (teneurs en matière sèche et diamètre des tubercules réduits).

Ce résultat fait écho à un précédent projet de recherche, ABRATATOUILLE (2014 – 2020 ; soutien financier de la fondation de France et de la fondation picard), porté par AGROOF, visant à étudier des cultures maraîchères sous noyers en climat méditerranéen. Les résultats ont montré que la présence d'arbres en intra-parcellaire pouvait induire une compétition sur les tomates notamment (rendement réduit de plus de la moitié), lorsque le niveau d'ombrage était supérieur à 60%. Toutefois, pour des niveaux d'ombrage modéré inférieur à 55%, des rendements similaires au témoin ont été obtenus avec des tomates de meilleure qualité commerciale. Par ailleurs, les tomates cultivées en agroforesterie présentaient moins de défauts que les tomates en plein soleil et avaient donc une meilleure qualité commerciale (Beral et al., 2019).

A des latitudes plus basses, dans les tropiques, la croissance et le rendement de la pomme de terre seront impactés par la compétition pour les nutriments et l'eau avant de subir les effets de l'ombrage en SAF car le rayonnement moyen est particulièrement élevé. En climat tempéré, bien que les tendances indiquent une évolution à la hausse des températures et des rayonnements moyens journaliers, les premiers facteurs limitants pourraient être la lumière et la température.

Effets de l'ombrage et de la température

La pomme de terre, grâce à son mécanisme d'assimilation de carbone en C3, ne nécessite pas de fortes intensités lumineuses pour arriver au point optimal de photosynthèse. Son activité photosynthétique sature à des rayonnements photosynthétiquement actifs de 400 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Mariana & Hamdani, 2016; Pleijel et al., 2002). Néanmoins, plusieurs études montrent la sensibilité de la pomme de terre à l'ombrage.

a. Croissance des pommes de terre

Selon les variétés étudiées et le niveau d'ombrage appliqué, il est possible d'observer un phénomène d'étiollement comme mécanisme de compensation à l'absence de lumière. Sous ombrage, les tiges s'étirent et croissent plus que la normale. Une étude aux Etats-Unis (Menzel, 1985), montre qu'en réduisant la radiation moyenne journalière de 70%, les plants de la variété Sebago peuvent être 50% plus grands que les plants en plein soleil. Demagante & Vander Zaag (1988), ont trouvé qu'en réduisant la luminosité de 46% avec un filet de pêche,

les pommes de terre sont plus hautes de 20 à 30 cm selon les variétés. En Égypte, Abdrabbo et al. (2013), mesurent des hauteurs de plants 10 cm plus élevées pour la variété Valor lorsqu'elle est cultivée sous un filet noir. En Indonésie, Mariana & Hamdani, 2016, observent ce même phénomène dès 30% d'ombrage sur 4 variétés de pomme de terre (Atlantic, Spunta, Dan Raja, Granola), avec des hauteurs pouvant dépasser un contrôle en plein soleil de 26 cm. A contrario, en Allemagne, Schulz et al., 2019 n'ont démontré aucun impact significatif de l'ombrage (12, 26 et 50% testés) sur la hauteur des plants pour la variété Selma. Aussi il semblerait que les mécanismes de compensation dépendent à la fois du type d'ombre appliquée, de la température, de la variété, mais aussi du contexte pédoclimatique.

Les températures élevées auraient elles aussi un rôle dans l'accroissement de la hauteur des plants (Rykaczewska, 2015). Cela rejoint les données des instituts techniques comme l'ITAB et Arvalis, (Gravouelle, 2011; Rey et al., 2015), selon lesquelles des photopériodes courtes favoriseraient la tubérisation, tandis que des journées longues couplées à des températures élevées stimuleraient la croissance de la pomme de terre.

b. Développement des pommes de terre

Dans la littérature scientifique, l'influence de la lumière, de la température et de la photopériode sur le développement de la pomme de terre a été étudiée.

Dans une étude aux Philippines (Demagante & Vander Zaag, 1988), une exposition à de longues photopériodes implique un retard de développement, notamment pour la sénescence des plants. Ce résultat est confirmé plus tard par Kooman et al. (1996a), qui montrent que le développement semble être accéléré par des températures élevées et des photopériodes courtes, notamment jusqu'à la fin du développement foliaire.

D'autres études avancent l'effet de l'exposition à la lumière sur le développement. En particulier, l'ombrage semble retarder le développement de la pomme de terre. En Allemagne, Schulz et al., 2019 montrent que pour des niveaux d'ombrage supérieurs à 12%, l'apparition de stades de développement clés comme l'initiation de la floraison et le début de la sénescence peuvent avoir plusieurs jours de retard. Pour un ombrage de 54%, l'initiation de la tubérisation peut être retardée jusqu'à 15 jours (Demagante & Vander Zaag, 1988). En revanche, l'ombrage ne semble pas avoir d'impact sur la levée des pommes de terre (Schulz et al., 2019). En effet, celles-ci puisent dans les réserves du tubercule mère jusqu'à développer des organes photosynthétiquement actifs lors de l'émergence, aussi une modification des rayonnements reçus n'influe pas sur ce stade.

Les températures ont également un rôle dans la phénologie. L'optimum de température pour l'émergence des plants se situe entre 20 et 25°C, le développement foliaire entre 25 et 35°C, mais des températures plus basses sont nécessaires à la tubérisation (entre 15 et 25°C) (Dutt et al., 2017; Timlin et al., 2006). Ces résultats questionnent l'effet indirect de la lumière sur la température du sol, qui peut, en plein champ, être la cause principale du retard de développement plus que l'ombrage.

Ces modifications dans le développement de la pomme de terre peuvent avoir un impact sur le rendement final. Kooman et al. (1996a), montrent dans leur étude que la longueur du cycle de développement influence directement le rendement. Une entrée prématurée en sénescence par exemple laisse moins de temps aux organes photosynthétiquement actifs d'accumuler des sucres à destination des tubercules, qui auront des teneurs en matière sèche plus faibles. On peut donc se demander si à l'inverse, un retard de développement implique une durée de photosynthèse plus longue et donc plus de carbone alloué aux tubercules.

c. Rendement et qualité des tubercules de pomme de terre

Le rendement est directement déterminé par le nombre de tubercules par plant, leur poids et donc indirectement par leur teneur en matière sèche (Schulz et al., 2019).

Des études ont montré un effet négatif de l'ombrage sur le rendement en tubercules de la pomme de terre. En 1990 par exemple, une étude au Sri Lanka montre qu'une réduction du rayonnement de 50% implique des baisses de rendement de 50% pour la variété Désirée (Kuruppuarachchi, 1990). En Allemagne, Schulz et al. (2019), trouvent aussi une diminution des rendements de 50% en réduisant de moitié la lumière incidente, résultat pouvant s'expliquer par une teneur plus faible en matière sèche. Certaines études lient ces baisses de rendement au nombre de tubercules par plant (Chen, 2003). Dans une autre étude, la pomme de terre Désirée n'a qu'un tubercule en moins par plant sous 54% d'ombrage, par rapport au témoin en plein soleil (Demagante & Vander Zaag, 1988), mais une teneur en matière sèche par tubercule significativement plus faible. Le rendement est indirectement déterminé par des facteurs de croissance, comme le nombre de plantes par hectare, le nombre de tiges et de stolons par plante (Putz, 1989; Struik et al., 1990). Wurr et al., 1997 expliquent la diminution du nombre de tubercules sous 70% d'ombrage par l'altération de la formation des stolons secondaires et ramifiés.

Il semblerait que sous ombrage, le rendement soit en partie réduit par la diminution des teneurs en matière sèche dans les tubercules. En effet, plusieurs études ont montré l'altération de la répartition de la biomasse entre les organes photosynthétiquement actifs et les organes reproductifs dans de telles conditions. Menzel (1985), montrent que la réduction des radiations moyennes journalières induit une redistribution de la biomasse des tubercules vers les organes aériens. Chen, 2003 ont abouti à des résultats similaires, avec des proportions moindres en sucrose et glucose dans les tubercules sous ombrage. Dans une étude de Gawronska et al. (1990), la réduction de 75% de l'intensité lumineuse affecte la répartition de la biomasse au détriment du développement des tubercules (seulement 17 à 44% de la biomasse aérienne allouée aux tubercules contre 60 à 74% en pleine lumière). Dans leur étude de la pomme de terre sous 50% d'ombrage, Schulz et al. (2019), trouvent 4 fois plus de biomasse dans les feuilles que dans les tubercules, contre un ratio équivalent à 1 en pleine lumière. Ces résultats diffèrent selon le type d'ombrage et le stade au cours duquel il est appliqué. D'après Chen, 2003, lorsque l'ombre s'applique lors du grossissement des tubercules, alors le volume des cellules des tubercules augmente et on observe une accumulation accrue de la biomasse dans les racines. A l'inverse, si l'ombre est appliquée lors de l'initiation de la tubérisation, alors la biomasse accumulée est plus importante dans la tige.

Ainsi, il existerait donc un seuil de tolérance de la pomme de terre à l'ombrage (dépendant de la variété, des conditions pédoclimatiques et du stade de développement exposé) permettant de maintenir des rendements égaux à la culture en plein soleil. Schulz et al. (2019) déterminent ce seuil de tolérance à 26% d'ombrage pour la variété Selma dans le Sud de la France.

La température ambiante et du sol influencerait aussi le rendement. La température optimale de développement et productivité des pommes de terre serait de 20°C (Rykanowska, 2015). Sous hautes températures (35/25°C), la tubérisation serait moins intense qu'en conditions tempérées et des diminutions de rendement de l'ordre de 24% pourraient être observées. Ce résultat semble directement lié à l'humidité du sol, réduite sous hautes températures. Par ailleurs, le carbone alloué aux tubercules diminuerait en condition de stress hydrique (amidon) d'après Hancock et al. (2014) et Timlin et al. (2006). La hausse des températures aurait

également un effet négatif sur l'aspect des tubercules (déformations). De plus, les températures élevées altèrent également le transfert des assimilats de la photosynthèse vers les tubercules (Dutt et al., 2017), qui seraient stockés dans les feuilles (Hancock et al., 2014). Les réponses physiologiques de la pomme de terre aux températures élevées et à l'ombrage sont liées au comportement de la culture en stress hydrique.

Il a été montré que par la modification du microclimat, les arbres pouvaient réduire l'évapotranspiration du système, en particulier par un effet tampon sur les températures. Toutefois, des études ont montré que les arbres pouvaient concurrencer les cultures pour la ressource en eau du sol (Jose, 2000). Il est donc légitime de se demander si les arbres concurrencent ou facilitent l'accès à la ressource en eau pour les cultures associées.

Ainsi, la littérature scientifique donne à voir un panel de résultats sans pour autant aboutir à des certitudes quant au comportement de la pomme de terre en conditions agroforestières. Aussi, à la demande d'agriculteurs, des références techniques et économiques sont en cours d'acquisition.

c) Présentation du projet ALMANAC

Le projet ALMANAC (Accompagner le Maraîchage Agroforestier par une Approche Collaborative), prend place dans ce contexte. Soutenu par la Fondation de France, ce projet porte sur l'agroforesterie maraîchère en zone méditerranéenne et se décompose en 4 actions. La première porte sur l'analyse technico-économique de ces systèmes, la deuxième, sur celle des performances agronomiques des cultures maraîchères, la troisième sur la mise en place d'ateliers et échanges techniques, et la dernière sur la diffusion des connaissances acquises au cours du projet. La présente étude s'intègre dans l'action 2 du projet, coordonnée par la SCOP AGROOF et porte plus particulièrement sur l'étude des performances agronomiques de certaines cultures maraîchères en agroforesterie sur 3 sites situés dans le Gard et le Vaucluse. Les cultures de pommes de terre, d'oignons et de salades ont été suivies sur ces sites. Cette étude fait suite à un précédent travail effectué par Lola Broyer en 2023. Les dispositifs expérimentaux, notamment microclimatiques, ont été concentrés sur la culture de la pomme de terre.

Ce contexte pose donc la problématique suivante :

*Dans quelle mesure la présence d'arbres adultes en agroforesterie maraîchère a-t-elle un effet sur les performances agronomiques des cultures de pomme de terre (*Solanum tuberosum*) en région méditerranéenne et par quels mécanismes s'applique cet effet ?*

Cette problématique peut se décomposer en 3 questions sous-jacentes dont découlent des hypothèses :

1/ Quelles sont les modifications du microclimat engendrées par la présence d'arbres et par leurs modalités de taille ?

- a) La présence d'arbres en intra parcellaire modifie le microclimat par la réduction des rayonnements journaliers, un effet tampon sur la température et l'humidité relative. Ces modifications sont modulées selon la typologie des systèmes agroforestiers, la variété cultivée, et les conditions pédoclimatiques propres à chaque système.

2/ Quelles sont les réponses écophysiologiques de la pomme de terre aux modifications de microclimat notamment concernant des données de croissance, de développement et de rendement ?

- a) La modification du microclimat et notamment l'ombrage généré par la présence d'arbres en intra parcellaire induit un retard de développement pour la pomme de terre et modifie ses paramètres de croissance via la mise en place de mécanismes de compensation pour la ressource en lumière dès 50% d'ombrage par rapport aux cultures en plein soleil.
- b) La présence d'arbres en intra parcellaire a un effet négatif sur les rendements en tubercules pour la pomme de terre et notamment pour les teneurs en matière sèche des tubercules via la modification du microclimat.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Afin de présenter en détails les expérimentations et les résultats obtenus, seul un des trois sites suivis au cours de l'étude est présenté dans ce rapport : les Terres de Roumassouze.

1. Caractéristiques générales du site d'étude

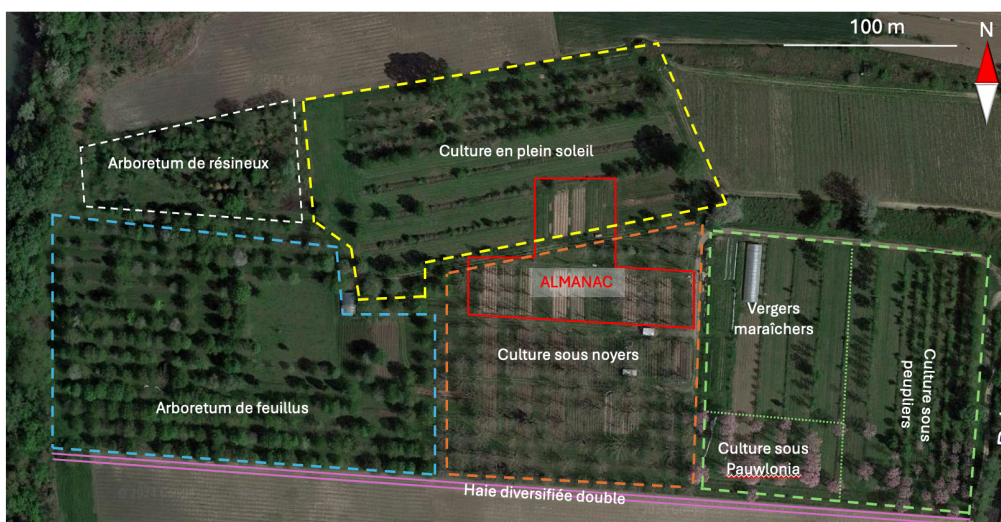


Figure 1. Vue satellite des Terres de Roumassouze et des dispositifs expérimentaux du site (Google Earth).

Les Terres de Roumassouze est un site expérimental en agroforesterie géré par AGROOF SCOP et situé à Vézénobres, dans le Gard. Le site est situé aux coordonnées géographiques 44°03'28"N 4°06'40"E, à une altitude de 103 mètres au-dessus de la mer, sous climat méditerranéen, avec un hiver doux humide et un été chaud et sec. Les précipitations d'avril 2024 à juillet 2024 mesurées sont de 138mm (données de Météo France). Il s'étend sur 11 ha et accueille une diversité de peuplement agroforestiers implantés dont la majorité par l'INRAE en 1996. Dans la poursuite de Denis Flores, ancien propriétaire des terres et maraicher de 2010 à 2022, Olivier Gavach et Helena Ménager se sont installés en 2023 sur 3 hectares de maraîchage biologique diversifié. Leur activité maraîchère se situe entre arbres fruitiers et noyers hybrides (3000 m²) et sous serre (100 m²). L'accès à l'eau pour l'irrigation se fait par forage. Le site est schématisé en Figure 1.

Les parcelles support de l'étude, nommées « dispositif ALMANAC », recouvrent 4500 m² au total. Le sol y est sablo-limoneux avec un pH de 8, une teneur en matière organique de 2,5 à 2,75% et un rapport de C/N de 12-13, ce qui caractérise une décomposition rapide de la matière organique. Une nappe alluviale affleure à 2m sous la surface et le gardon borde les terres, quelques mètres en contrebas.

2. Matériel biologique

L'expérimentation de cette étude a lieu sur les parcelles en agroforesterie maraîchère, composé de noyers hybrides (*Juglans regia* x *Juglans nigra*) implantés initialement à 100 tiges/ha et d'une culture intercalaire de pommes de terre (*Solanum tuberosum*) de conservation, de la variété Charlotte. Cette variété est de taille moyenne, présente un port

semi dressé et semi feuillu (*CHARLOTTE Pomme de terre*, s. d.). Son tubercule de chair jaune est de forme oblongue allongée. Les tubercules mères utilisés pour la plantation proviennent d'une coopérative agricole biologique.

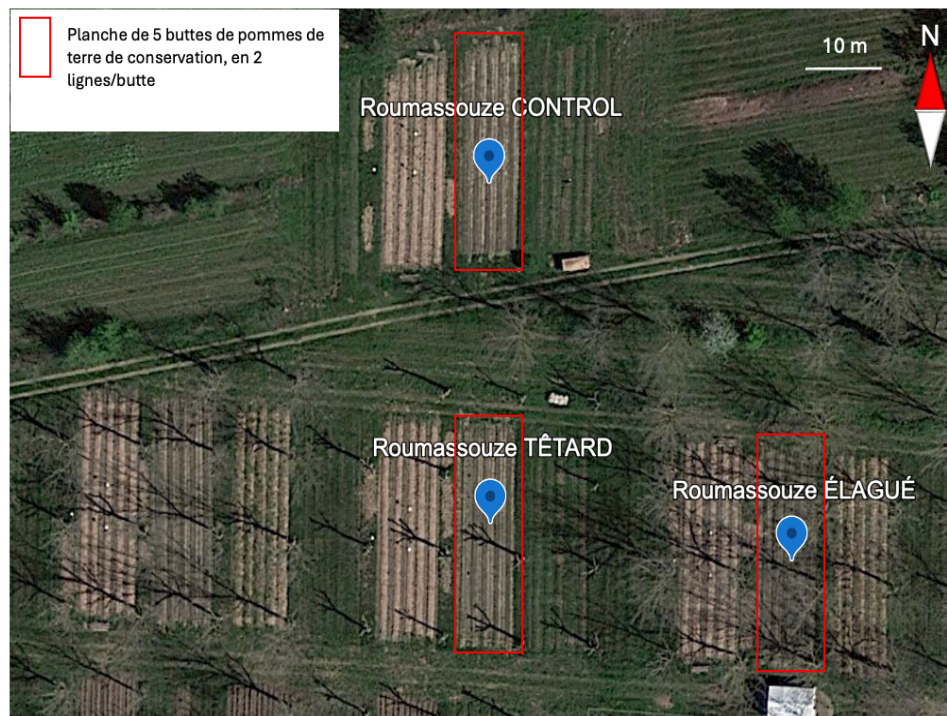


Figure 2. Vue satellite des trois modalités (L, T, C) étudiées sur les parcelles expérimentales à Terres de Roumassouze (Google Earth).



Figure 3. Photographies des parcelles L et T aux Terres de Roumassouze, Mai 2024.

3. Dispositif expérimental

Trois modalités sont à l'étude au sein du projet ALMANAC :

- Une modalité ÉLAGUE (L), caractérisée par des noyers de 20 m de haut environ, plantés en 20 x 10 m (éclaircissement par rapport à la densité initiale réalisé en 2022), orientés selon l'axe Nord/Sud, caractérisé par une suppression de la première couronne et un houppier s'élevant à une vingtaine de mètres de hauteur. A l'ouest de la parcelle, suite à l'éclaircissement, une repousse de jeunes noyers forme une cépée.
- Une modalité TÊTARD (T), caractérisée par des arbres de 13 mètres de haut environ, plantés en 10 x 10 m, orientés selon l'axe Nord/Sud, dont les houppiers ont été rabattus autour des principales branches charpentières en 2023.
- Une modalité CONTROL (C), modalité témoin en plein soleil, ne présentant pas d'arbres à proximité directe, dont la conduite est depuis 2015 la même que les parcelles agroforestières L et T.

Les trois parcelles ont la même dimension : 25 x 10 m, soit 250 m² de surface. Les parcelles expérimentales sont présentées en **Figure 2** et les modalités agroforestières T et L en **Figure 3**

Les pommes de terre de la variété Charlotte ont été implantées le 25 mars 2024 avec un espacement de 30 cm sous un mélange de paille et fumier (4-5 kg de fumier / m²) sur les 3 parcelles C, T et L. Le précédent cultural sur l'année 2023 était des lignes d'oignons, salade, choux chinois herbes aromatiques. Chaque parcelle a été désherbée à l'aide de l'arracheuse à pommes de terre (forte pression de sorgho, *Sorghum bicolor*, en 2023). Les trois parcelles expérimentales C, T et L sont de 5 buttes (rangs) chacune. Sur chaque rang ont été plantées deux lignes de pommes de terre, orientées selon l'axe Nord/Sud. Les planches ont été désherbées manuellement au cours de la campagne. L'irrigation sur les lignes de pommes de terre a été réalisée à l'aide d'un goutte-à-goutte. Toutes les caractéristiques de l'expérimentation sont résumées dans le **Tableau 1**.

	Site	Terres de Roumassouze (Vézénobres, 30)		
	Parcelle	Control (C)	Tétârd (T)	Élagué (L)
Culture de pommes de terre	Variété	Charlotte		
	Caractéristiques	Port moyen et semi dressé. Semi précoce, assez peu sensible au mildiou. Tubercule allongé, moyen à chair et peau jaunes. Teneur en matière sèche des tubercules: 20,8%		
	Rendement potentiel	58,8 t/ha		
	Implantation	25/03/2024		
	Récolte	01/08/2024		
	Espacement	Espacement de 0,3 m sur le rang, 2 lignes par butte, 5 buttes par parcelle.		
	Irrigation	Goutte-à-goutte		
	Fertilisation	Fumier à l'implantation (4-5 kg/m ²)		
	Gestion de l'enherbement	Passage de l'arracheuse à pommes de terre avant implantation, manuellement au cours de la campagne		
Espèces pérennes	Infrasstructure agroforestière	X	Noyers hybrides (Juglans regia x Juglans nigra) en 10x10m, implanté selon l'axe Nord-Sud en 1996.	
	Conduite	X	Trogné en 2023. Fauchage de la bande enherbée.	Port libre. Fauchage de la bande enherbée.

Tableau 1. Récapitulatif du dispositif expérimental.

4. Variables d'études

Sur chaque modalité étudiée, les cultures ont fait l'objet de suivis réguliers visant à évaluer la croissance et le développement des pommes de terre, en lien avec des mesures caractérisant le microclimat de chaque parcelle et l'état hydrique du sol.

a) Caractérisation du microclimat

Afin de caractériser le microclimat, des enregistreurs autonomes de type Voltcraft ont été placés à différents points sur les parcelles expérimentales afin de mesurer la température et l'hygrométrie de l'air. Le Rayonnement Photosynthétique Actif (PAR) a été mesuré à l'aide de capteurs afin d'observer un potentiel effet d'ombrage selon les modalités. Afin de consolider ces mesures, l'ouverture de la canopée a été mesurée à l'aide de photos hémisphériques une fois durant la campagne, en juillet au stade pleine feuille des arbres. Les photos ont été traitées sur le logiciel CanEye, aux différents points d'échantillonnage par modalité. La vitesse du vent a été suivie à l'aide d'anémomètres, à des points stratégiques dans les parcelles. Les précipitations ont été mesurées avec des pluviomètres connectés.

Par ailleurs, afin d'appréhender l'état hydrique du sol dans la zone d'approvisionnement des cultures, les données d'irrigation ont été relevées en fin de campagne pour chaque site afin de prendre en compte les apports d'eau des cultures et la tension en eau du sol a été suivie à 20 et 40 cm de profondeur à l'aide de tensiomètres. Toutes ces grandeurs ont été mesurées avec un pas de temps de 10 minutes, d'avril à juillet. Les points de mesure ont été répétés dans la limite du possible par modalité et par rang afin d'assurer la robustesse des données.

b) Croissance et développement de la pomme de terre

Les suivis agronomiques ont été réalisés sur des placettes délimitées de 5 individus. Chaque placette était répétée 3 fois sur le même rang cultivé.

- La croissance des plants de pomme de terre a été évaluée à l'aide de mesures de hauteur et du nombre de tiges développées par plant. De plus, des mesures de l'indice de végétation par différence normalisée (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) ont été faites à l'aide d'un GreenSeeker et ont permis d'appréhender la vigueur et la quantité de végétation par plant et par placette.
- Le développement des pommes de terre a été suivi à l'aide de l'échelle BBCH des stades phénologiques de la pomme de terre (Hack et al., 1993).
- L'état sanitaire a été évalué tout au long de la campagne au cours des suivis et noté sur 5 selon le pourcentage de surface foliaire touchée.

Les mesures précédemment listées ont été réalisées toutes les deux semaines, 6 fois au cours de la campagne, du 15 mai au 27 juillet 2024 (SUIVI 1 à 6).

- La masse surfacique foliaire ou Leaf Mass per Area (LMA) a été mesurée une fois pendant la campagne au stade pleine feuille, le 28 juin 2024. Cet indicateur de croissance mesure l'investissement en masse sèche des feuilles par unité de surface interceptant la lumière. En d'autres termes, les feuilles avec une LMA élevée ont un limbe plus épais ou des tissus plus denses, ou les deux (Wright et al., 2004).

$$\text{LMA (g.cm}^{-2}\text{)} = \text{Masse sèche d'une feuille (g)} / \text{surface (cm}^2\text{)}$$

Cette mesure a été faite sur la 4^e plus haute feuille du plant, pour une pression d'échantillonnage de 15 feuilles par rang. Les feuilles complètes fraîches ont été scannées à l'aide du scanner CanoScan LiDE 400 puis l'image traitée sous ImageJ afin d'obtenir la surface foliaire. Les masses fraîche et sèche ont été pesées après séchage à l'air libre puis étuvage pendant 24h à 75°C.

c) Production et qualité de la pomme de terre

En fin de campagne, à la récolte, les productions brute et nette ont été estimées par le comptage et la pesée des tubercules de chaque plant suivi au cours de la campagne avant et après tri selon les normes CEE-ONU-FFV-52. Au sein de la production nette, deux classes de commercialisation ont été distinguées selon l'arrêté du 3 mars 1997 du Comité National Interprofessionnel de la Pomme de Terre (CNIPT, Comité National Interprofessionnel de la Pomme de Terre, 1997). La classe 1 étant de meilleure qualité commerciale que la classe 2, pouvant présenter quelques défauts.

Puis le calibrage de chaque tubercule a été réalisé selon 4 classes :

- <35 mm (les pommes de terre dont le diamètre est inférieur à 18 mm sont déclassées)
- 35-45 mm
- 45-55 mm
- >55 mm

À la récolte, la matière sèche des tubercules a été mesurée après étuvage d'échantillons de tubercules pendant 24h à 80°C. La matière sèche d'un tubercule par plant suivi a été mesurée. Toutes les mesures et variables étudiées sont résumées dans le Tableau 2.

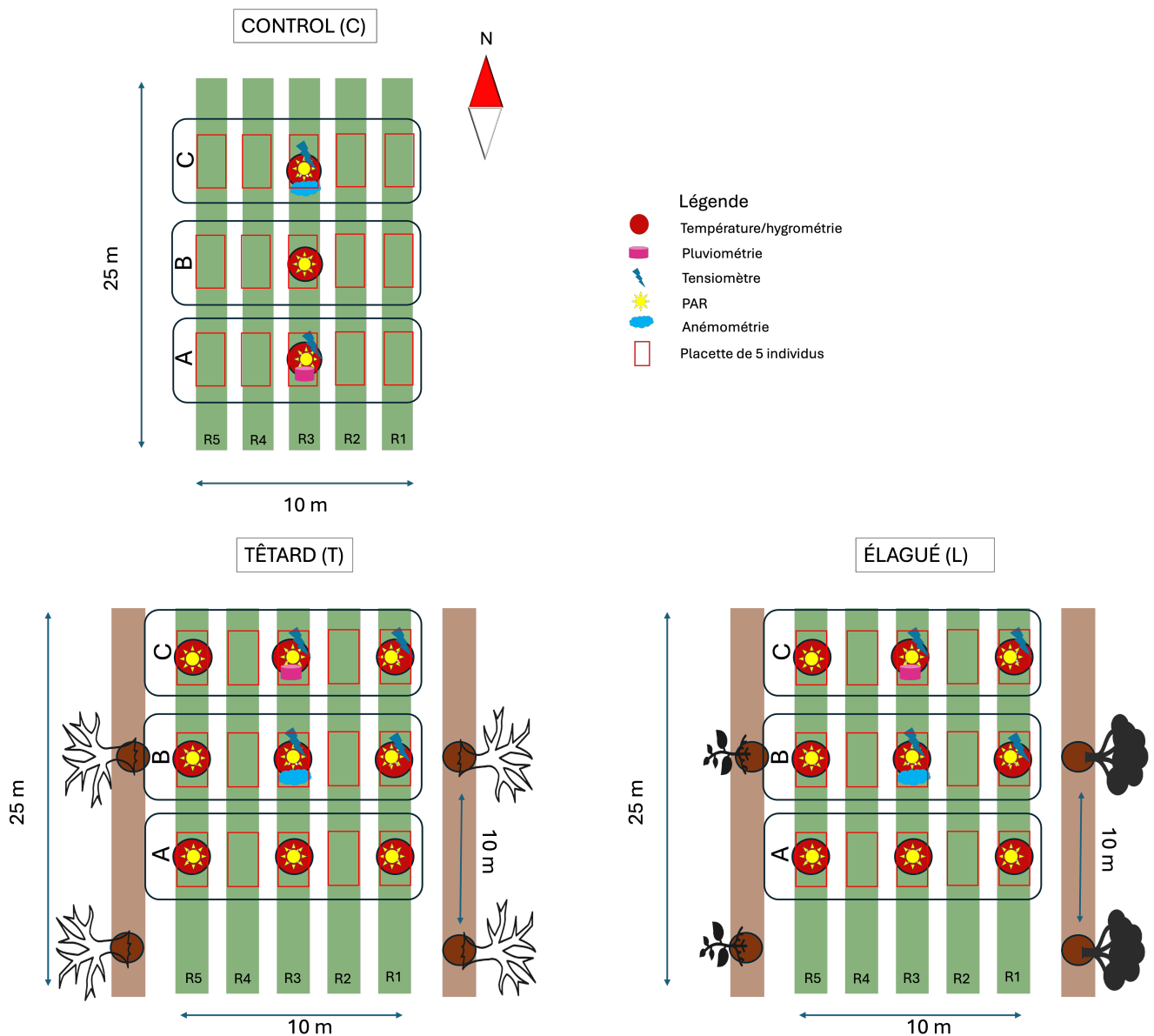
ETUDE	VARIABLE	PRESSION D'ECHANTILLONNAGE			PAS DE MESURE	RÉSULTATS ATTENDUS
		CONTROL	TETARD	ELAGUE		
MICROCLIMAT	Rayonnement Photosynthétiquement Actif (PAR)	3 points	9 points	9 points	Toutes les 10 minutes	Caractérisation du microclimat (i.e. ombrage, température et humidité relative ambiantes, de l'état hydrique du sol)
	Température					
	Hygrométrie					
	Anémométrie	1 point	1 point	1 point		
	Pluviométrie					
	Tension en eau du sol	2 points	4 points	4 points		
	Ouverture de la canopée	15 points	15 points	15 points	Une fois en juillet	
	Irrigation	X	X	X	Données pour l'ensemble de la campagne	
CROISSANCE ET DÉVELOPPEMENT	Stades de développement	75 plants	75 plants	75 plants	Toutes les 2 semaines	Suivi au cours du temps de la croissance et du développement des pommes de terre
	Hauteur					
	Nombre de tiges					Proportion et cause des différents dégâts causés
	NDVI					
	Etat sanitaire					
	Masse surfacique foliaire (LMA)	75 feuilles	75 feuilles	75 feuilles	1 fois au stade pleine feuille	Croissance et biomasse allouée aux organes aériens
PRODUCTION	Production brute	75 plants	75 plants	75 plants	1 fois à la récolte	Rendement et qualité commerciale des tubercules
	Production nette					
	Calibres					
	Masse sèche des tubercules	75 tubercules	75 tubercules	75 tubercules		Biomasse allouée aux tubercules

Tableau 2. Récapitulatif des variables mesurées au cours de l'étude, du pas de temps et pression d'échantillonnage associés.

5. Plan d'échantillonnage

L'échantillonnage des parcelles expérimentales a été réalisé selon un gradient d'éloignement aux aménagements arborés en comparaison d'une modalité témoin et répété sur 3 transects. Aux Terres de Roumassouze, les rangs ont été nommés de 1 à 5 selon l'axe

Est-Ouest, le rang 1 (R1) étant le plus à l'Est. Les transects ont été nommés A, B, C et disposés selon un gradient Nord-Sud, le transect A étant le plus au Sud (cf. Figure 4). Une placette est la jonction entre un rang et un transect.



6. Méthodes de traitement statistiques

Le prélèvement des données a été effectué du 1^{er} avril 2024 au 1 août 2024. Les résultats obtenus pour chaque variable ont été comparés entre eux d'après leur modalité d'ombrage et microclimat associés. Le traitement statistique des données a été réalisé via le logiciel *RStudio* grâce à des tests paramétriques et non paramétriques ($\alpha = 5\%$) :

- Régression linéaire simple
- Test non paramétrique de Kruskal-Wallis + Test post hoc de Dunn
- ANOVA à 1 facteur + Test post hoc de Tukey

III. RÉSULTATS

Certains tensiomètres et pluviomètres n'ayant pas fonctionné, ces résultats ne sont pas présentés.

1. Caractérisation du microclimat

a) Rayonnements

MODALITÉ	Ouverture de canopée $\pm$ SE (%)	Cumul de PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$)	Irrigation (mm)
CONTROL	93.02 $\pm$ 0.27	834495.2	44 544
TETARD	52.79 $\pm$ 2.93	471684,7	49 192
ELAGUE	26.68 $\pm$ 2.32	315586,1	22 920

Tableau 3. Tableau récapitulatif de l'ouverture de canopée (%), du cumul de PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) et de l'irrigation apportée par modalité. Moyennes $\pm$ erreur standard.

L'ouverture de la canopée mesurée pour chacune des modalités C, T et L en juillet montre une ouverture moyenne de 91% en C, 51% en T et 23% en L (cf. Tableau 3). Ainsi, la canopée en T est 43% plus fermée par rapport à la modalité Control, et 71% plus fermée en L. Ces résultats se traduisent par un cumul de rayonnement photosynthétique actif (PAR) nettement supérieur sur l'ensemble de la campagne pour la modalité C, par rapport aux modalités sous couvert arboré T et L (cf. Tableau 3). Le cumul sur la totalité de la campagne montre que les parcelles agroforestières T et L ont respectivement reçu 43% et 62% de PAR en moins par rapport à la modalité ouverte C. Enfin, l'irrigation apportée sur toute la saison était de 44 544 mm pour la parcelle en plein soleil, de 49 192 mm pour la parcelle TETARD, et de 22 920 pour la parcelle ELAGUE.

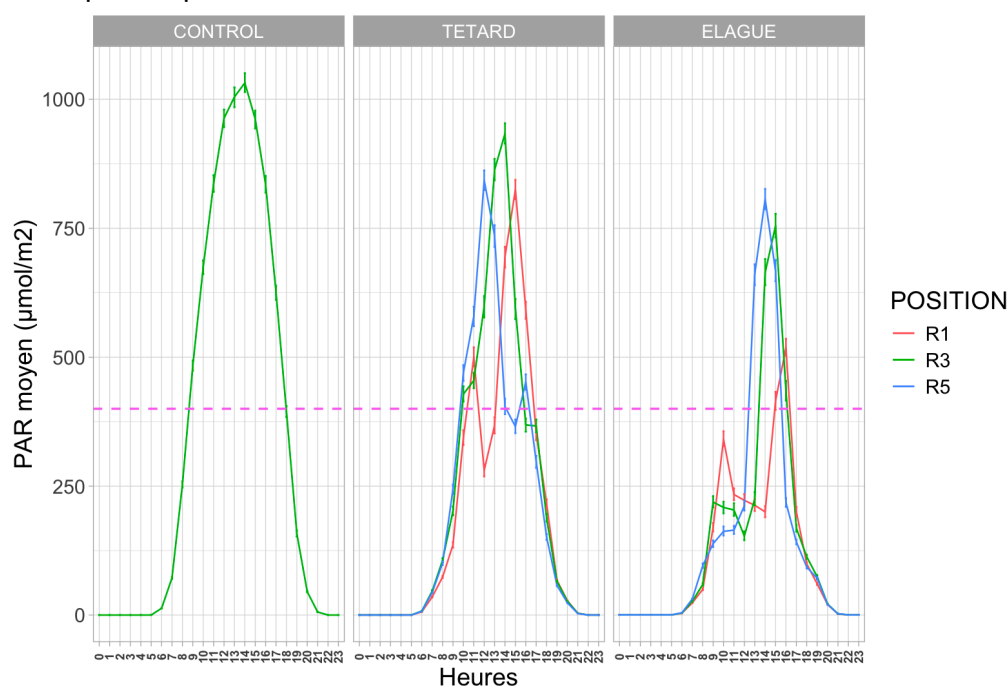


Figure 5. Courbes de PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) journalier par rang et modalité. La ligne violette représente l'intensité lumineuse de saturation photosynthétique.

Les mesures de PAR ont été observées par rang et par jour pour chaque modalité (cf. Figure 5). Le pic d'ensoleillement pour chaque parcelle est atteint à 14h, au midi solaire. Les modalités agroforestières présentent des disparités d'ensoleillement selon les rangs. En T, la dynamique journalière d'ensoleillement diffère selon les rangs. Le rang 5 (R5), soit le rang le plus à l'Ouest, semble atteindre son pic d'ensoleillement vers 12h. A l'inverse, le rang le plus à l'Est, l'atteint plus tard, vers 15h. Le rang au centre (R3) l'atteint à 14h. L'ensoleillement des rangs de la modalité L montrent un ensoleillement tardif dans la journée, qui débute progressivement (entre 12 et 13h) avec les rangs les plus éloignés des arbres, R5 puis R3. L'ensoleillement en R1 est particulièrement retardé et ne débute que vers 14h. Par ailleurs, la quantité de PAR reçue en R1 est nettement inférieure aux rangs éloignés des arbres. Pour ces mêmes rangs, des niveaux de PAR similaires sont observés dans la modalité T. Ces dynamiques journalières d'ensoleillement par rang semblent se mettre en place dès mai (Annexe 1), lors du débourrement des noyers hybrides. Enfin, l'intensité lumineuse de saturation photosynthétique est largement atteinte au cours de la journée en C. En T, ce seuil ne sera atteint que l'après-midi pour R1, et inversement pour R5. En L, les rangs proches des arbres adultes, notamment R1, ne dépassent ce seuil de $400 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ que tard dans l'après-midi.

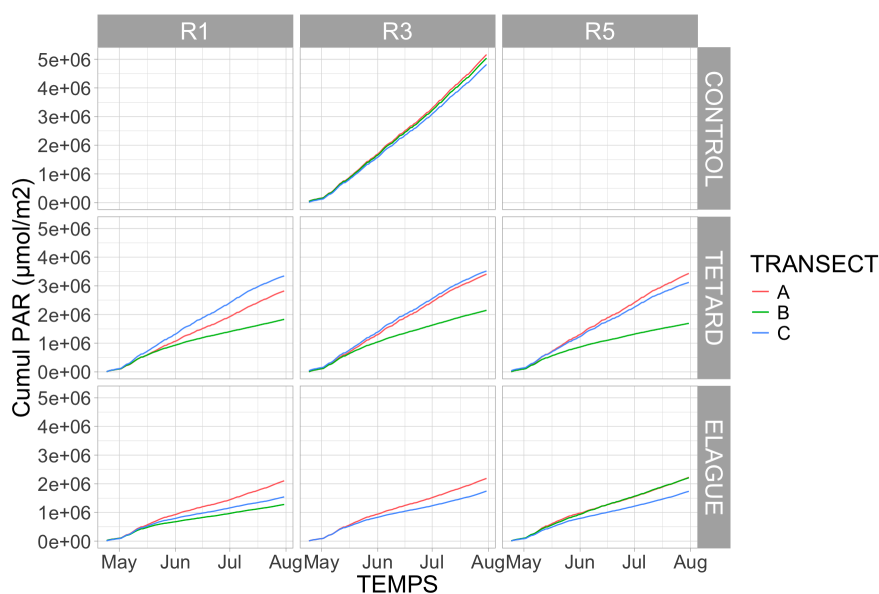


Figure 6. Cumul de PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) sur la campagne par modalité, rang et transect.

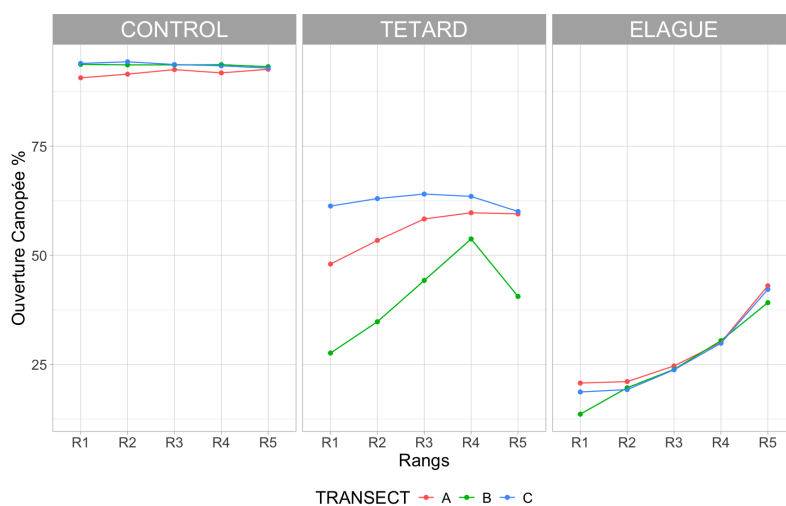


Figure 7. Ouverture de canopée (%) par rang et par transect pour chaque modalité

Le PAR cumulé sur l'ensemble de la campagne de relevés a été observé par rang et transect pour chaque modalité (cf. Figure 6). Le R3 de la modalité C semble homogène, de même que les placettes en L. En revanche le transect B de la modalité T (positionné dans l'alignement des arbres) semble cumuler moins de PAR que les autres transects et son cumul total de PAR semble rejoindre celle des placettes en L (cumul total de PAR $\sim 2e+06$). Les données d'ouverture de canopée présentées en Figure 7 appuient ce résultat. La courbe en T se présente plus sous forme de cloche, avec une ouverture de canopée plus prononcée au milieu de la parcelle, au plus loin des arbres se trouvant en bordure, excepté pour le transect B de la modalité T qui semble avoir une ouverture de canopée moins importante par rapport aux deux autres transects, ce qui rejoint les résultats de PAR précédemment présentés. L'ouverture de la canopée en L augmente avec la distance aux arbres (gradient de R1 à R5). La modalité C présente une ouverture de canopée homogène sur ses rangs.

b) Température et humidité relative

MODALITÉ	Températures $\pm$ SE (°C)	Amplitudes de température journalières moyennes $\pm$ SE (°C)	Humidités relatives $\pm$ SE (%)
CONTROL	17,95 $\pm$ 0,04	14,76 $\pm$ 0,40	71,77 $\pm$ 0,12
TETARD	18,07 $\pm$ 0,02	14,56 $\pm$ 0,28	71,29 $\pm$ 0,05
ELAGUE	18,08 $\pm$ 0,02	17,42 $\pm$ 0,25	71,31 $\pm$ 0,05
p-Value	1,60E-10	1,99E-09	2,20E-16

Tableau 4. Récapitulatif des températures moyennes, des amplitudes journalières de températures et de l'humidité relative moyenne pour chaque modalité (moyennes $\pm$ erreur standard). Test non paramétrique de Kruskal-Wallis, $\alpha = 5\%$.

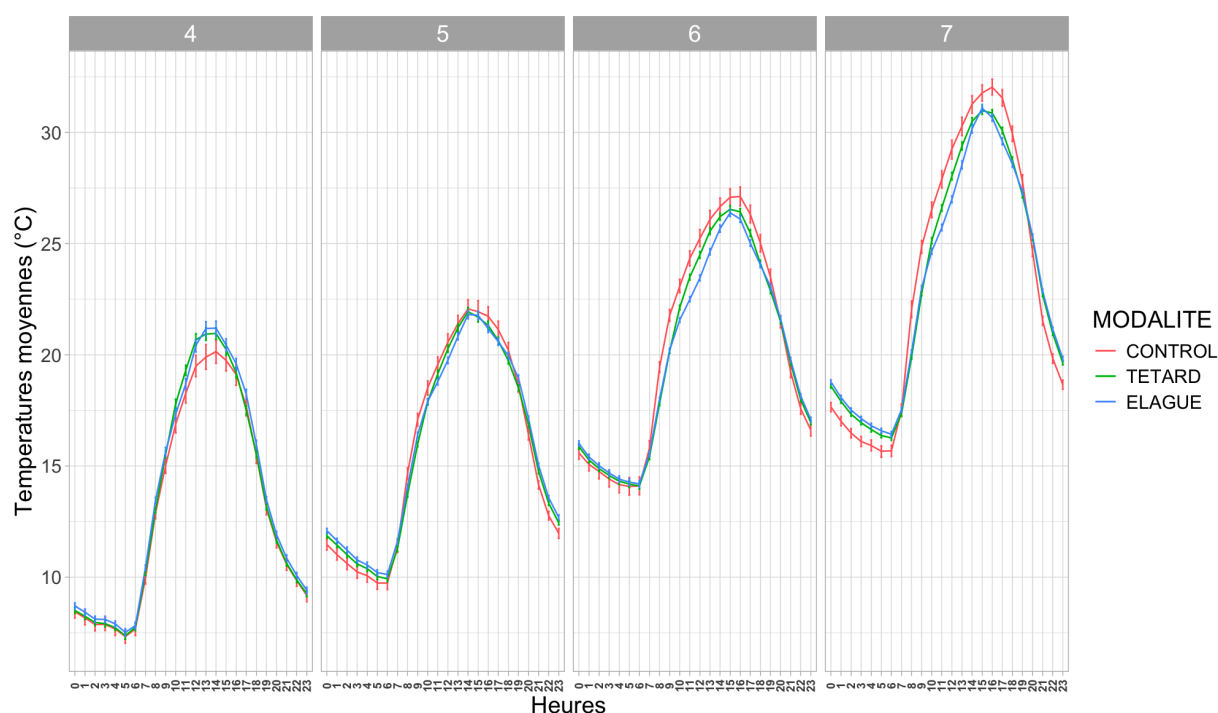


Figure 8. Évolution de la température journalière par modalité et par mois. Barres d'erreur = intervalle de confiance (95%).

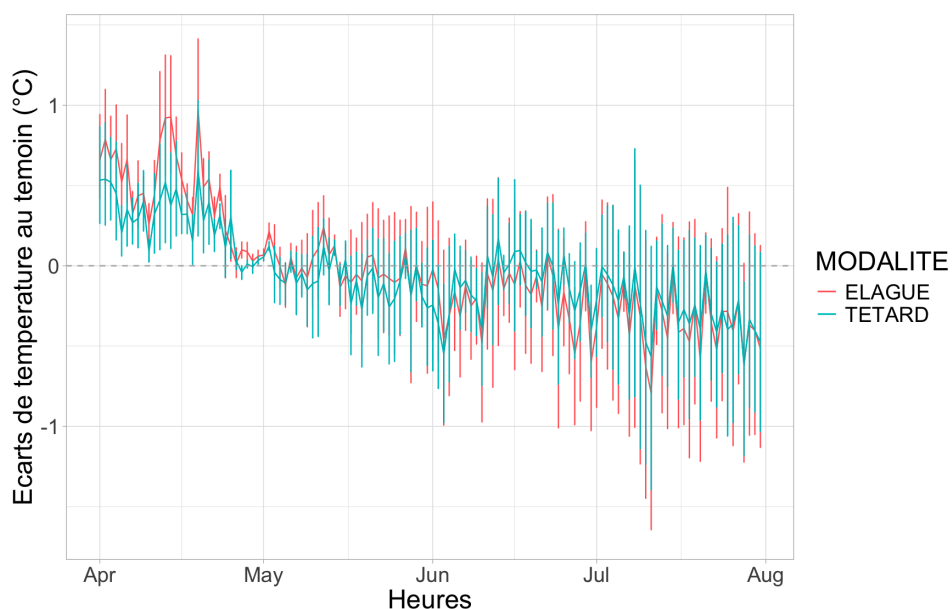


Figure 9. Écarts de température au témoin (°C) pour les modalités L et T. Barres d'erreur = intervalle de confiance (95%).

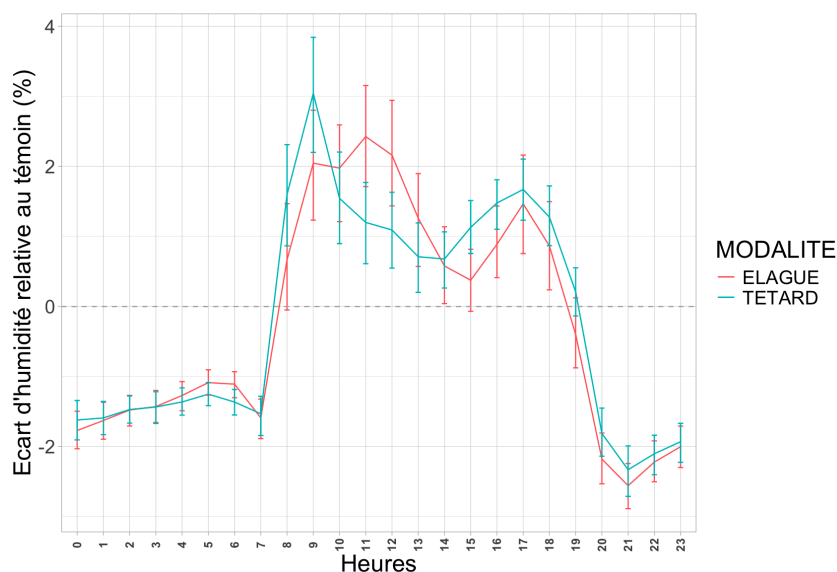


Figure 10. Écart d'humidité relative au témoin pour les modalités T et L (%). Barres d'erreur = intervalles de confiance à 95%.

Les températures moyennes par modalité varient peu (C : 17.95 ± 0.04 °C, T : 18.07 ± 0.02 °C, L : 18.08 ± 0.02 °C). Les amplitudes moyennes journalières de températures sont plus faibles en T (14.56 ± 0.28 °C) et C (14.76 ± 0.40 °C) par rapport aux amplitudes journalières dans la modalité la plus fermée (L : 17.42 ± 0.25 °C) (cf. Tableau 4). Les températures moyennes par heure et par modalité sont présentées en Figure 8. La température toutes modalités confondues augmente au cours de la campagne. En avril, le pic de chaleur pour les trois modalités se trouve entre 13h et 14h (~ 21.25 °C en T et L et ~ 20 °C en C), puis ce pic se déplace au fur et à mesure de la campagne vers 15h (~ 32 °C en C et ~ 31 °C en T et L). En avril, les températures diurnes (6-20h) sont plus faibles dans la modalité plein soleil. Cette tendance s'inverse dès mai où les températures diurnes sont plus faibles sous couvert agroforestier et semblent suivre un gradient $C > T > L$. A l'inverse, les températures nocturnes (20-6h) sont inférieures en plein soleil. Les écarts de température des modalités T

et L au témoin présentés en Figure 9 confirment ces résultats : en moyenne, dès mai, les températures en T et L sont plus faibles qu'en plein soleil.

L'humidité relative ne semble pas varier (71%) entre les trois modalités (cf. Tableau 4). Il est toutefois possible d'observer des écarts d'humidité relative sous couvert par rapport à la modalité ouverte en fonction des heures de la journée (cf. Figure 10). L'humidité relative diurne en T et L atteint jusqu'à 2% en plus en matinée par rapport à la modalité témoin. A l'inverse, l'hygrométrie nocturne sous couvert arboré est moindre par rapport au témoin.

2. Croissance et développement

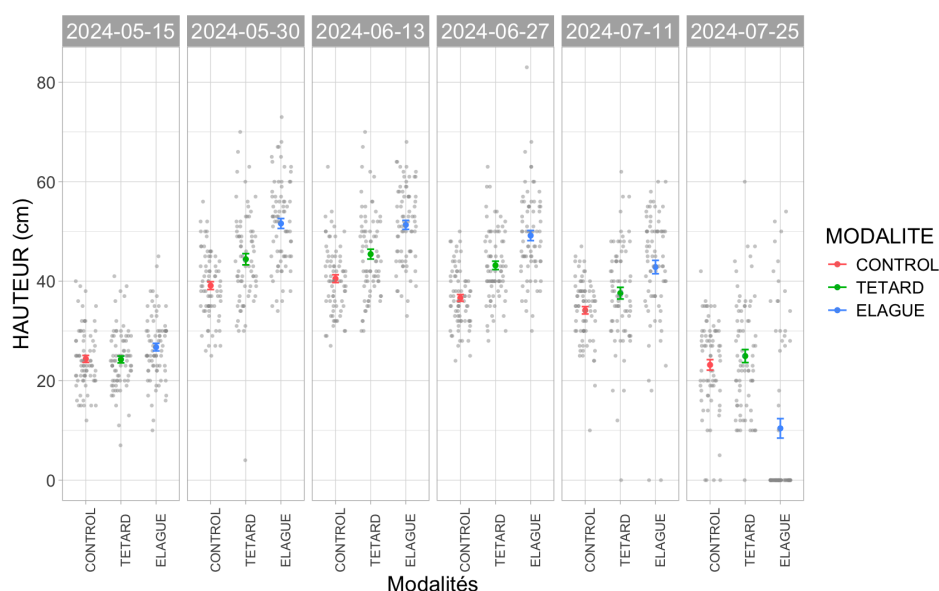


Figure 11. Évolution de la hauteur (cm) par modalité et par date de suivi. Moyennes $\pm$ erreur standard.

	Hauteur moyenne $\pm$ SE (cm)					
Modalité	15/05/2024	30/05/2024	13/06/2024	27/06/2024	11/07/2024	25/07/2024
CONTROL	24,37 $\pm$ 0,70	39,11 $\pm$ 0,79	40,51 $\pm$ 0,78	36,64 $\pm$ 0,68	34,15 $\pm$ 0,74	23,17 $\pm$ 1,06
TETARD	24,27 $\pm$ 0,70	44,41 $\pm$ 1,13	45,44 $\pm$ 0,99	43,17 $\pm$ 0,84	37,59 $\pm$ 1,17	24,95 $\pm$ 1,31
ELAGUE	26,75 $\pm$ 0,76	51,60 $\pm$ 1,00	51,32 $\pm$ 0,90	49,17 $\pm$ 1,02	42,84 $\pm$ 1,34	10,41 $\pm$ 1,96
Ecart T (% de CONTROL)	7,8	13,55	12,17	17,82	10,07	7,68
Ecart L (% de CONTROL)	9,77	31,94	26,68	34,2	25,45	-55,07

Tableau 5. Récapitulatif des hauteurs moyennes (cm) par date de suivi et modalité (moyennes $\pm$ erreur standard) et écarts de hauteur (%) au contrôle pour T et L.

La hauteur des plants, mesurée toutes les deux semaines, augmente progressivement pour atteindre sa valeur maximale au 13 juin 2024, pour ensuite diminuer jusqu'au dernier suivi, toutes modalités confondues (cf. Figure 11). La hauteur des plants est significativement plus grande dans les modalités agroforestières qu'en plein soleil et suit un gradient C>T>L (cf. Tableau 5). La modalité L peut être jusqu'à 34% plus grande que le contrôle et 17% pour T. Ce constat est valable du 2^e suivi (30 mai) au 5^e suivi (11 juillet). Au dernier suivi, le 25 juillet 2024, la hauteur des plants en L est 55% plus faible par rapport au témoin plein soleil. Le nombre de tiges ne différait pas par modalité au 13 juin 2024 (cf. Annexe 2).

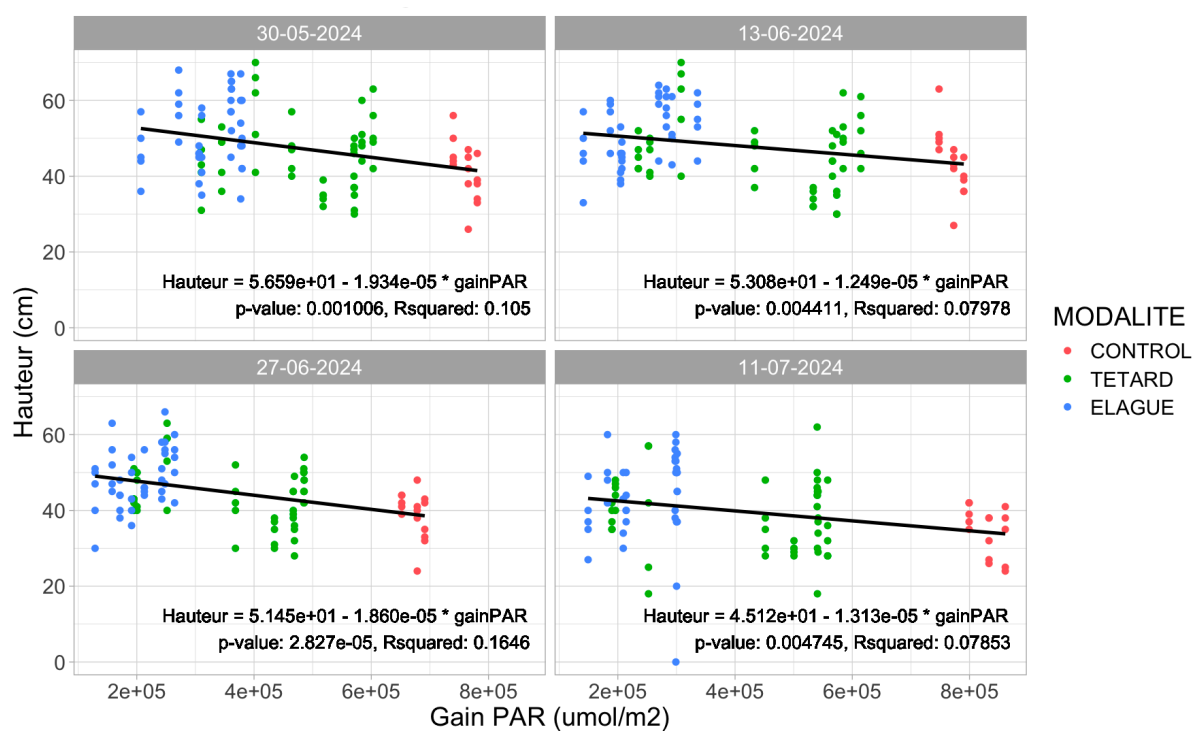


Figure 12. Courbes de régression linéaire simple entre la hauteur des plants (cm) et le gain de PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) pour les 4 périodes de suivis de la campagne 2024.

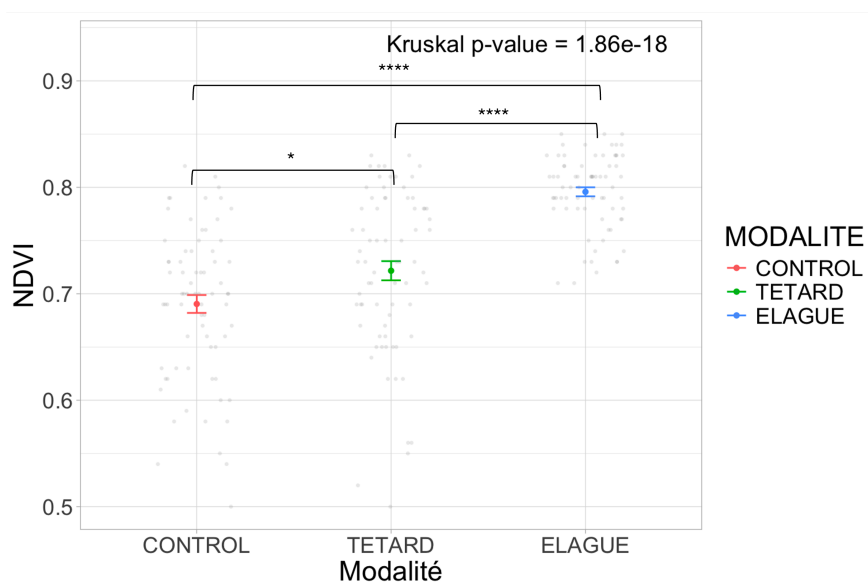


Figure 13. NDVI moyen par plant au 13 juin 2024. Test non paramétrique de Kruskal-Wallis, $\alpha = 5\%$, test post hoc de Dunn. Moyennes $\pm$ erreur standard.

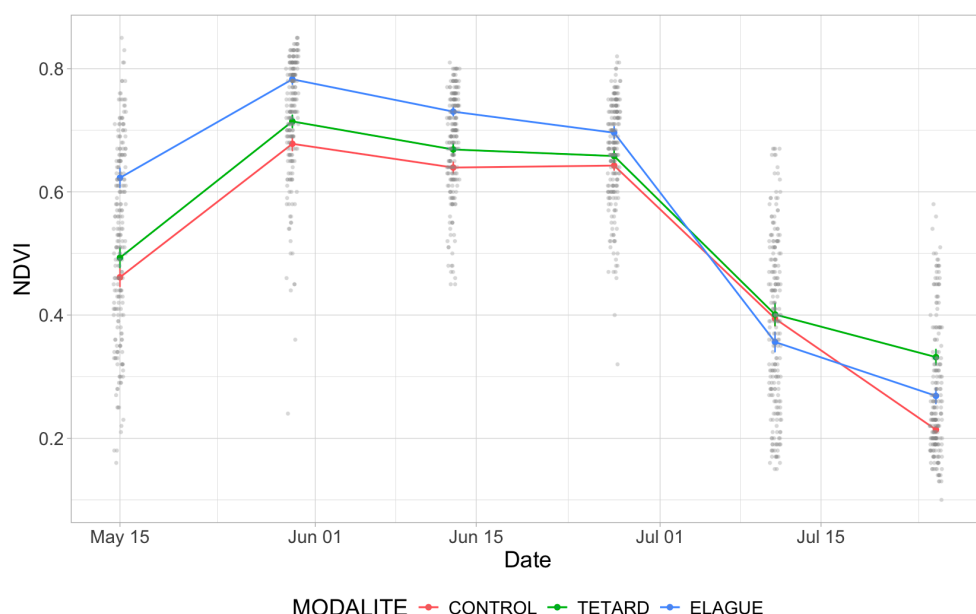


Figure 14. Courbes de NDVI aux différentes dates de suivis par modalité. Moyennes $\pm$ erreur standard.

Une corrélation négative entre la hauteur des plants (cm) toutes modalités confondues et le gain de PAR (μmol) a été observée (cf. Figure 12) pour chaque période entre les suivis. Au 30 mai 2024, la mesure de NDVI par plant était significativement plus élevée en L par rapport aux autres modalités (cf. Figure 13). Cet indicateur de croissance suit un gradient $C < T < L$. La quantité de végétation aérienne semble atteindre son maximum au 30 mai 2024 pour chacune des modalités (cf. Figure 14). La mesure de NDVI diminue ensuite progressivement jusqu'au 27 juin surtout pour la modalité L, puis plus fortement jusqu'au 25 juillet pour toutes les modalités. Ce résultat semble avoir été corrélé au développement de maladies fongiques dès le début du mois de juillet, réduisant ainsi la vigueur des plants. Au dernier suivi, la modalité T semble avoir le meilleur NDVI moyen, suivie par la modalité L puis C.

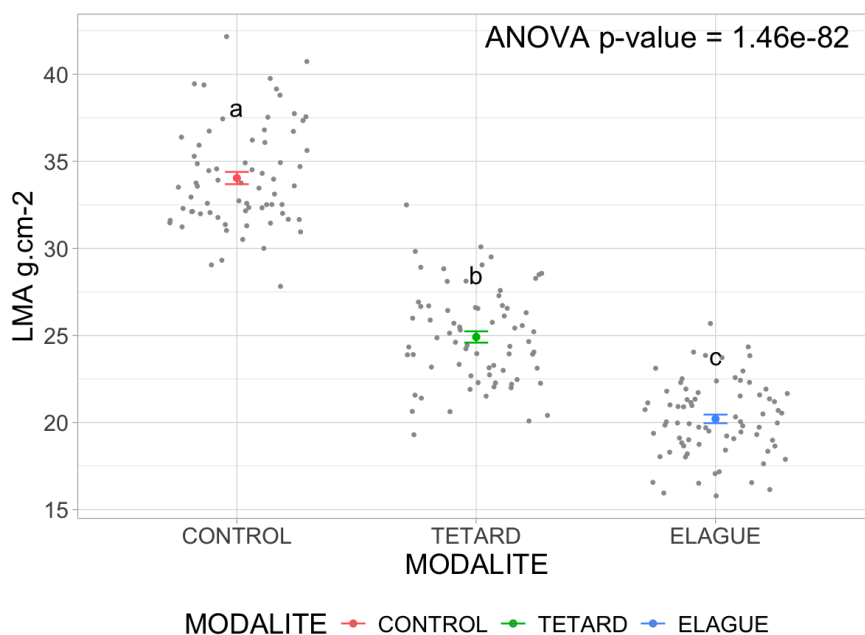


Figure 15. Masse surfacique (g.cm^{-2}) par modalité. ANOVA à 1 facteur, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Tukey. Moyennes $\pm$ erreur standard.

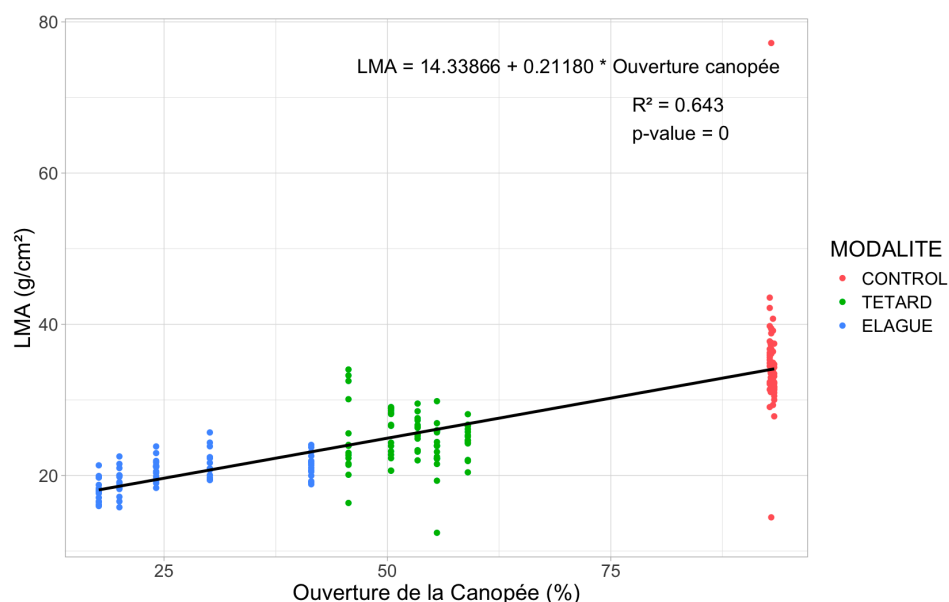


Figure 16. Régression linéaire simple pour la masse surfacique (LMA) en g.cm-2 en fonction de l'ouverture de la canopée.

Par ailleurs, les feuilles dans la modalité en plein soleil C ont une plus grande masse surfacique que celles des modalités agroforestières T et L. La masse surfacique suit un gradient C>T>L (cf. Figure 15). Aussi, une corrélation positive existe entre la masse surfacique et l'ouverture de la canopée avec un coefficient de corrélation de 0.21 (cf. Figure 16).

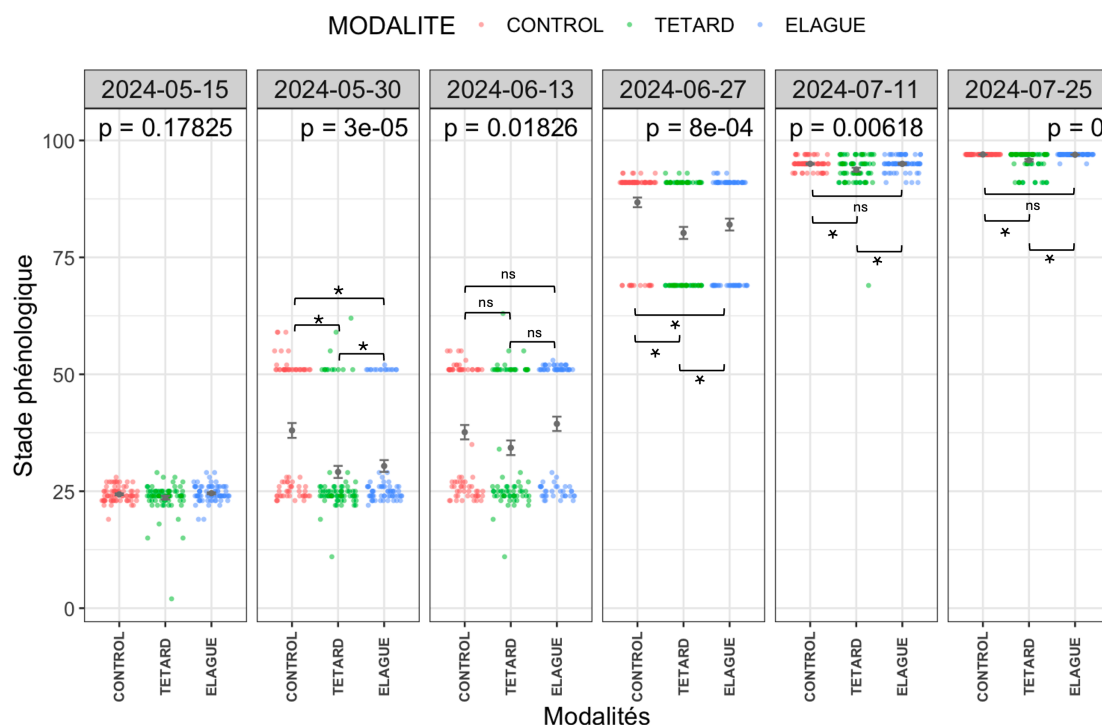


Figure 17. Stades phénologiques par modalité à chaque date de suivi. Test non paramétrique de Kruskal-Wallis, $\alpha = 5\%$, test post hoc de Dunn. Moyennes $\pm$ erreur standard.

L'inflorescence (stade de développement 50) est apparue plus rapidement pour les plants en modalité C par rapport aux modalités agroforestières T et L (cf. Figure 17). Ce retard est également visible lors du 4^e suivi, où le stade de sénescence (90) a été atteint plus rapidement et de manière plus homogène pour les plants en plein soleil que pour les plants en T et L, encore à des stades moins avancés (fin de floraison, 69).

3. Production et qualité

Modalité	Production brute $\pm$ SE (g)	Nombre de tubercules brut	Production nette $\pm$ SE (g)	Nombre de tubercules commercialisables
CONTROL	497,73 $\pm$ 19,43	11,08 $\pm$ 0,44	420,64 $\pm$ 20,59	8,48 $\pm$ 0,36
TETARD	294,95 $\pm$ 12,74	7,35 $\pm$ 0,30	256,78 $\pm$ 14,30	5,62 $\pm$ 0,29
ELAGUE	257,75 $\pm$ 12,35	7,47 $\pm$ 0,35	249,5 $\pm$ 12,65	6,36 $\pm$ 0,29

Tableau 6. Récapitulatif des productions brute, nette (g) et du nombre de tubercules brut et net. Moyennes $\pm$ erreur standard.

La production brute par plant est plus importante dans la modalité en plein soleil (497.73 $\pm$ 19.43 g par plant) que dans les modalités agroforestières (294.95 $\pm$ 12.74 g et 257.75 $\pm$ 12.35 g respectivement pour T et L) (cf. Tableau 6). La production brute est donc 40% inférieure à la modalité C en T et 48% inférieure en L. Par ailleurs, en plein soleil, les plants produisent près de 4 tubercules (commercialisables comme non commercialisables) de plus par plant par rapport aux plants sous couvert arboré. Les modalités agroforestières produisent donc 33% de tubercules en moins par rapport au plein soleil. Cet écart de production semble se réduire légèrement pour le rendement net. La modalité T ne produit plus que 38% en moins par rapport à C et L produit 40% en moins (cf. Tableau 6). L'écart se réduit également entre les modalités agroforestières et le plein soleil pour le nombre de tubercules commercialisables.

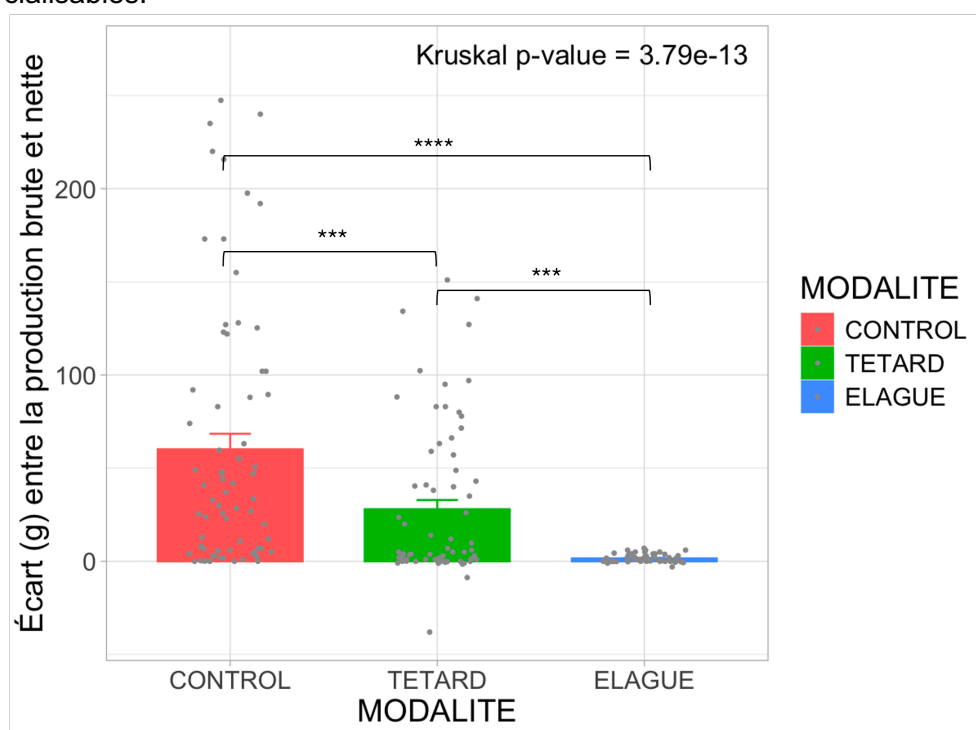


Figure 18. Écart (g) entre la production brute moyenne et la production nette moyenne par rang et par modalité à la récolte (8 août 2024). Test non paramétrique de Kruskal-Wallis, $\alpha = 5\%$, test post hoc de Dunn. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur standard.

La différence entre la production brute et la production nette suit un gradient C>T>L (cf. Figure 18). Cet écart semble significativement plus faible pour L par rapport aux autres modalités, de même pour T par rapport au plein soleil. Cet écart est proche de 0 pour la modalité la plus ombragée, reste en dessous de 50g pour la modalité T, et va au-delà des 75 g pour la modalité en plein soleil. Ainsi, sur l'ensemble de la production brute, la part de production commercialisable est meilleure en L, suivie par T puis par C.

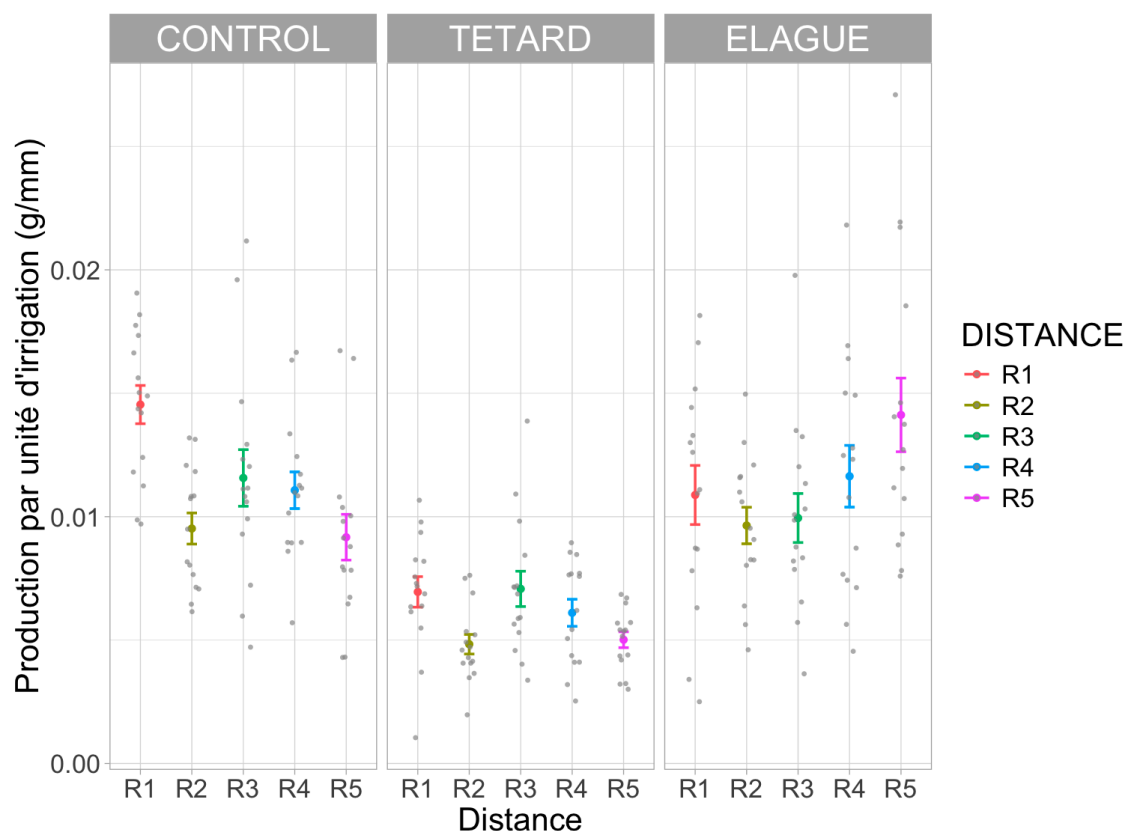


Figure 19. Production brute par unité d'eau irriguée (g/mm) par rang pour chaque modalité. Moyennes $\pm$ erreur standard.

Le rapport entre la production brute et l'irrigation apportée à chaque modalité a été étudiée (cf. Figure 19). Il semblerait que les modalités C et L se démarquent significativement de la modalité TETARD (cf. Annexe 4). En L, ce rapport suit un gradient d'éloignement aux arbres, avec une meilleure production par unité d'irrigation proche de la cépée, au plus loin des arbres adultes. En T, ce rapport semble homogène sur tous les rangs, et plus faible globalement qu'en C et L. En C, il est particulièrement élevé sur le R1, puis diminue jusqu'au R5, avec des valeurs notablement faibles en R2.

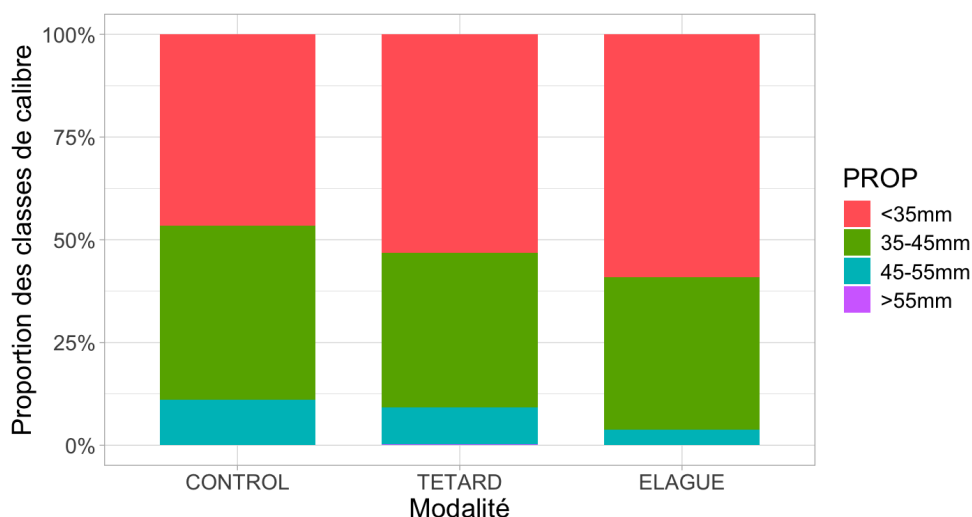


Figure 20. Proportions des classes de calibre par modalité à la récolte (1^{er} août 2024).

La proportion de tubercules de petit calibre (< 35 mm) paraît augmenter avec la fermeture de la canopée (gradient C<T<L) (cf. Figure 20). Près de 60% de la production nette est constituée de tubercules de petit calibre pour la modalité L, plus de 50% pour T et moins de 50% pour C. La production nette en C semble majoritairement expliquée par des tubercules de gros calibres (45-55mm) et de calibres moyens (35-45mm), proportions qui diminuent dans les modalités T et L. Très peu, voire aucun tubercule de très gros calibre (>55mm) n'a été trouvé. En revanche, aucune différence significative du poids moyen par tubercule n'a été trouvée entre les modalités (cf. Annexe 3).

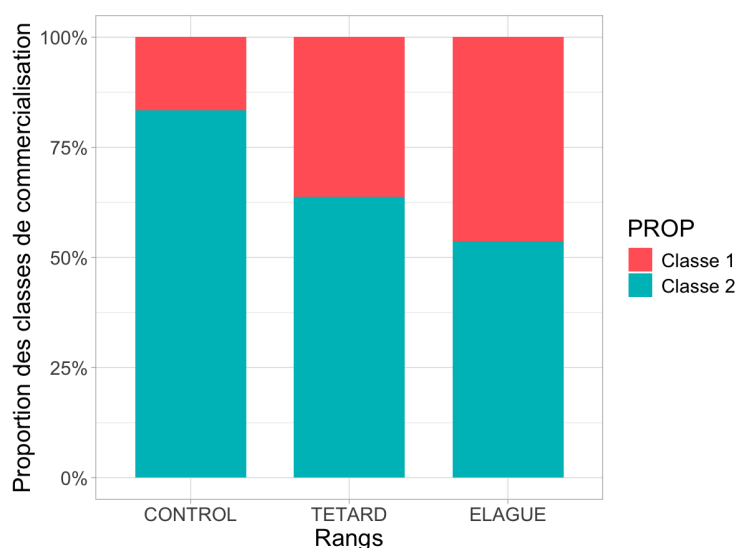


Figure 21. Proportions des classes de commercialisation (1 et 2) par modalité à la récolte (1^{er} août 2024).

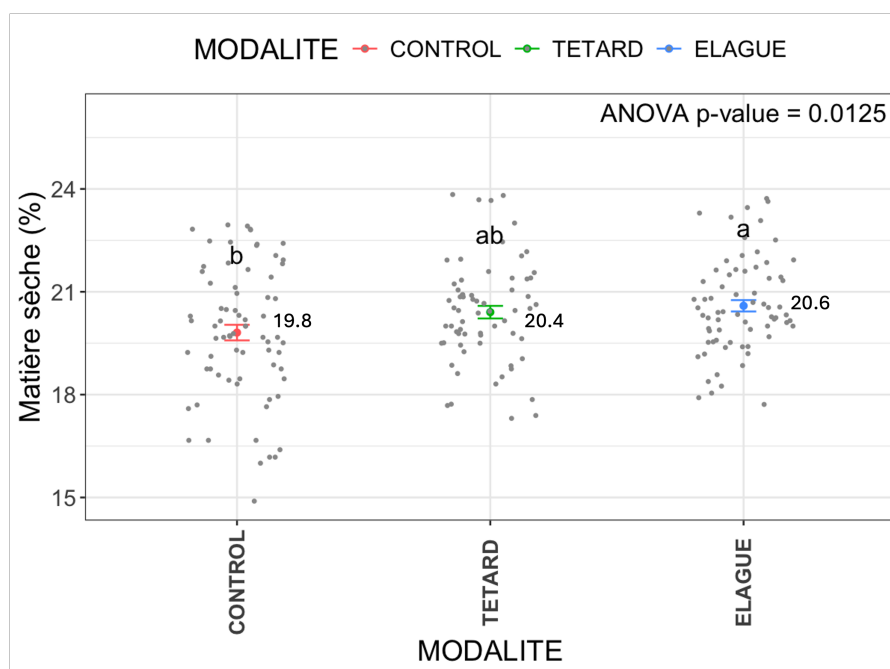


Figure 22. Matière sèche (%) des tubercules lors de la récolte (1^{er} août 2024) en fonction des modalités. Test ANOVA à 1 facteur, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Tukey. Moyennes $\pm$ erreur standard.

La proportion de tubercules en qualité commerciale supérieure (classe 1) est plus élevée dans les parcelles agroforestières L et T par rapport à la parcelle ouverte (cf. Figure 21). La proportion de tubercules en classe 1 suit un gradient L>T>C, avec en L 49% des

tubercules catégorisés classe 1, 44% en T et 23% en C. La teneur en matière sèche des tubercules est significativement plus grande pour la parcelle L par rapport à la parcelle témoin (cf. Figure 22). Cet indicateur de qualité semble suivre une tendance C<T<L.

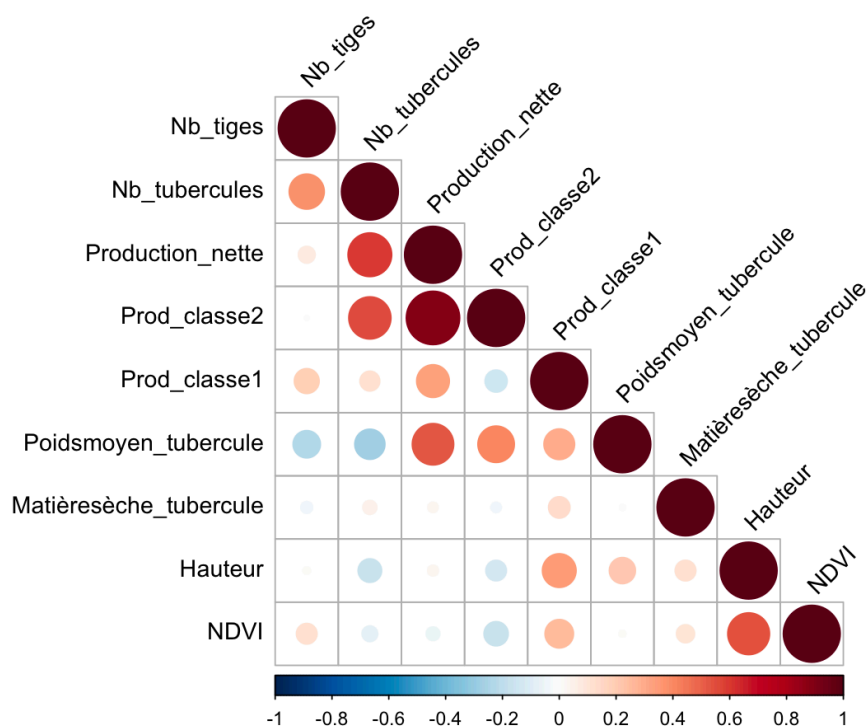


Figure 23. Matrice de corrélation des variables de production (à la récolte) et des variables de croissance (au 13 juin 2024).

Une corrélation positive relativement forte a été trouvée entre le nombre de tubercules produits par plant et la production nette totale et la production nette de classe 2 (cf. Figure 23), de même entre la hauteur et le NDVI par plant. Le nombre de tiges par plant est lui aussi corrélé positivement au nombre de tubercules. Par ailleurs, une telle corrélation est également visible entre le poids moyen par tubercule et les variables de production nette (toutes classes commerciales confondues). La hauteur influe elle aussi positivement ce poids moyen par tubercule, ainsi que la production nette de classe 1, de meilleure qualité commerciale. Les données de NDVI semblent également avoir un effet positif sur la production de haute qualité commerciale. A l'inverse, plus le nombre de tubercules et de tiges par plant est élevé, plus le poids moyen par tubercule diminue.

IV. DISCUSSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer dans quelle mesure la présence d'arbres adultes en agroforesterie maraîchère a un effet sur les performances agronomiques de la culture de pomme de terre (*Solanum tuberosum*) en région méditerranéenne et les mécanismes sous-jacents à cet effet. Trois modalités, différant par leur taille et donc leur ombrage, ont été comparées au site des Terres de Roumassouze. Seule la variété Charlotte a été étudiée. Le suivi de 225 plants au cours de leur cycle de développement sous différents niveaux d'ombrage : 0% (plein soleil), 43% (modalité TÊTARD) et 62% (modalité ELAGUE) a montré des différences de comportement, notamment pour la croissance, le développement et la production de pommes de terre. La biomasse aérienne des plants sous couvert agroforestier était particulièrement développée par rapport au plein soleil. Le cycle de développement de ces mêmes plants présentait un retard notamment pour l'initiation de la floraison et l'entrée en sénescence. Enfin, la production au global était significativement plus faible en T et L par rapport à C, mais la qualité commerciale des tubercules était proportionnellement meilleure. De plus, la matière sèche contenue dans les tubercules était significativement meilleure dans la modalité la plus ombragée à la récolte.

1. Caractérisation du microclimat.

a) Rayonnements

La caractérisation microclimatique des trois modalités a permis en premier lieu de quantifier une réduction (43% en T et 62% en L) du rayonnement photosynthétique actif dans les modalités agroforestières directement causé par l'ouverture de la canopée et la taille des arbres en T et L. L'ensoleillement hétérogène sur ces parcelles, principalement lié à la distance aux arbres en bordure de parcelle, leur taille et leur orientation Nord-Sud a été mis en lumière. Ces résultats confirment les réductions de PAR mesurées dans les modalités agroforestières observés par Tian et al. (2017) et par une thèse réalisée sur ce même site d'étude en 2018 (Martin-Chave, 2018).

b) Température et hygrométrie

Les différences de températures, bien que faibles au global entre les modalités, montrent des tendances d'effet tampon en T et L par rapport au témoin plein soleil. Cet effet semble être à la fois saisonnier (températures globales plus élevées avant mai, puis plus faibles dès avril) et journalier (températures diurnes plus fraîches et nocturnes plus chaudes). L'amplitude de température plus grande en L pourrait s'expliquer par l'asymétrie d'ombrage due à la présence d'une cépée à l'Ouest et non pas d'arbres adultes bien développés. De la même manière, l'humidité relative ne varie pas significativement entre les modalités. Néanmoins une tendance similaire à l'effet tampon a été observée pour l'hygrométrie, plus élevée en journée en T et L et plus faible la nuit par rapport au contrôle. Les tendances observées d'effet tampon des variations extrêmes de température et d'hygrométrie observées sont en adéquation avec plusieurs références scientifiques (Barradas & Fanjul, 1986; Beer et al., 1998; Quinkenstein et al., 2009; Ramananjatovo et al., 2021) sans être pour autant aussi marquées. Des variations non significatives de températures et d'hygrométrie sous ombrage ont déjà été observées dans la littérature scientifique (Menzel, 1985).

Ces premiers résultats confirment notre hypothèse de départ, selon laquelle *la présence d'arbres en intra-parcellaire modifierait le microclimat par la réduction des radiations, induisant un effet tampon des températures et de l'humidité relative*. Il est important de noter que les écarts de températures et d'hygrométrie mesurés à l'aide de sondes Voltcraft entre les modalités agroforestières et le plein soleil se trouvent assez proche de la marge d'erreur des sondes (0.5°C). Par ailleurs, le changement des abris microclimatiques pour les sondes Voltcraft en cours de campagne (24 avril 2024) a pu impacter le calibrage des sondes. Enfin, il serait pertinent d'adopter une approche plus fine concernant les mesures des radiations perçues afin d'évaluer de potentielles classes de longueur d'ondes réduites.

2. Croissance et développement de la pomme de terre en agroforesterie maraîchère.

a) Croissance

Les suivis réguliers de la hauteur des plants dans chaque modalité ont mis en avant une croissance étiolée des plants en agroforesterie selon un gradient $L > T > C$, linéairement corrélé à l'ombrage. Ce résultat a montré que les plants recevant 62% de PAR en moins, avec une fermeture de canopée de 71% dans la modalité L, pouvaient être jusqu'à 34% plus grands qu'en plein soleil. D'autres études sont arrivées à des constats similaires (Abdrabbo et al., 2013; Demagante & Vander Zaag, 1988; Mariana & Hamdani, 2016; Menzel, 1985). Il semblerait que cette croissance étiolée trouve sa source dans le mécanisme antagoniste des gibbérélines (GAs) avec la lumière (De Lucas et al., 2008; García-Martínez & Gil, 2001; Menzel, 1985) et plus particulièrement dans l'inactivation du phytochrome B, lui-même régulateur de la biosynthèse et du catabolisme des GAs (Jackson et al., 1996). Certaines références scientifiques ont démontré le rôle que pourraient jouer certaines longueurs d'ondes infrarouges lointaines dans l'activation du phytochrome B.

Par ailleurs, il est important de noter dans notre expérimentation que la croissance étiolée en réponse à une forte réduction de la lumière semble moins sensible et les différences de hauteur restent dans la limite des 12 cm. Cette moindre sensibilité à l'ombrage peut être expliquée par différents facteurs, notamment la variété étudiée (Mariana & Hamdani, 2016). Par exemple, les plants ombragés de la variété Désirée, qui a été suivie sur l'un des deux autres sites de l'étude, étaient plus petits que les plants en plein soleil (résultats non présentés). Le type de lumière et les longueurs d'ondes appliquées semblent aussi jouer un rôle important dans la croissance de la pomme de terre (Seabrook, 2005). Cette croissance étiolée, en hauteur, s'accompagne d'un « étalement » de la biomasse. En effet, les résultats obtenus, notamment de NDVI, mettent en lumière une quantité de végétation aérienne plus fournie pour les plants à l'ombre. L'accumulation accrue de biomasse aérienne sous ombrage a été démontrée dans la littérature scientifique (Mariana & Hamdani, 2016). Les résultats de notre étude portent à croire que l'augmentation de la production de végétation aérienne résulte d'un étalement de la biomasse, notamment au niveau foliaire, plutôt que d'une accumulation de celle-ci. En effet, le nombre de tiges principales par plant ne semble pas varier entre les modalités et plus l'ouverture de canopée est réduite, plus la masse surfacique foliaire diminue, ce qui constitue une forme de compensation à la réduction d'intensité lumineuse en agroforesterie. Cette stratégie, décrite dans Poorter et al. (2009), vise à exploiter au mieux la capacité photosynthétique d'une unité de matière sèche (i.e. de chlorophylles) donnée en conditions d'ombrage. Dans sa revue, Seabrook (2005), référence des expérimentations *in vitro* montrant également des feuilles plus épaisses sous un traitement de lumière

additionnelle. Mariana & Hamdani (2016), montrent notamment dans leur étude que la surface foliaire (LAI) est plus grande pour 50% d'ombrage.

Ainsi, les différences de croissance aérienne observées entre les différentes modalités semblent directement liées à l'ombrage et relèveraient de mécanismes de compensation pour la lumière. Des mesures plus poussées visant à quantifier la biomasse aérienne totale produite auraient permis d'estimer si ces constats résultent uniquement d'un étalement de la biomasse (en hauteur et en surface foliaire) ou s'il existe une compensation de l'ombrage par la production accrue de biomasse photosynthétiquement active dans les modalités agroforestières.

b) Développement

Un retard de développement a été observé pour les pommes de terre des modalités agroforestières, notamment pour les stades de floraison et sénescence. Ce résultat concorde avec ceux de Schulz et al. (2019) qui relèvent dès 12% d'ombrage plusieurs jours de retard pour l'initiation de ces mêmes stades. Ce retard est rattrapé en fin de campagne pour les modalités ombragées qui atteignent elles aussi le stade de sénescence au dernier suivi, excepté pour la modalité T qui semble encore assez hétérogène. Dans Kooman et al. (1996a) est soulevé l'effet des températures élevées sur l'accélération du développement, notamment jusqu'à la fin du développement foliaire (à cheval sur le début de l'inflorescence). Dans notre étude, les écarts de températures restent modérés entre nos modalités, aussi l'ombrage serait responsable en premier lieu d'un tel retard. Cependant, il se pourrait que l'ombrage affecte directement des variables du sol telles que la température et l'humidité, jouant ainsi indirectement sur le développement et la croissance des pommes de terre (Ewing & Wareing, 1978; Kooman et al., 1996a; Rykaczewska, 2015; Struik et al., 1990; Timlin et al., 2006). Par ailleurs, l'effet de la photopériode est largement décrit dans la littérature scientifique (Demagante & Vander Zaag, 1988; Dutt et al., 2017). Aussi, il serait enrichissant de déterminer un seuil minimum d'intensité lumineuse afin de comparer les photopériodes entre les modalités.

L'ensemble des résultats sur la croissance et le développement des pommes de terre discutés ci-dessus valident l'hypothèse 2 - a) selon laquelle *la présence d'arbres induit un retard de développement pour la pomme de terre et modifie ses paramètres de croissance via la mise en place de mécanismes de compensation*. Dans la présente étude, cette hypothèse est valide dès 43% d'ombrage (parcelle T). Il aurait été intéressant d'analyser les longueurs d'ondes réduites ou absentes sous couvert agroforestier, afin d'avoir une compréhension plus fine des mécanismes métaboliques de croissance en place ici. Concernant le cycle de développement, des suivis plus réguliers et sous forme de nombre de jours avant apparition des différents stades auraient permis une approche plus robuste, certains stades clés se déroulant en quelques jours seulement et beaucoup se chevauchant entre eux. De même, bon nombre des stades phénologiques se déroulent sous terre, aussi des protocoles en destructif permettraient le suivi de certains stades tels que la tubérisation. Par ailleurs, la floraison et la fructification n'ont pas (ou très peu) été observés pour la variété Charlotte aux Terres de Roumassouze, à l'inverse de la variété Désirée par exemple, suivie sur l'un des terrains de cette étude. Enfin, lors des derniers suivis, le stade de sénescence observé était corrélé avec une attaque fongique de mildiou, aussi l'estimation de ce stade comprend certainement la dégradation foliaire induite par le champignon.

3. Performances agronomiques de la pomme de terre en agroforesterie maraîchère.

a) Production

Des baisses de production ont été observées, allant de 41% pour la modalité T jusqu'à 48% pour la modalité L (production brute). Le calibre et le poids spécifique des tubercules ne variant pas significativement entre les modalités, cet écart de production paraît causé par un nombre de tubercules réduit (33% en moins pour T et L par rapport au contrôle). Ce résultat rejoindrait d'autres études (Demagante & Vander Zaag, 1988; O'Brien et al., 1998) et notamment une selon laquelle l'application d'ombre sur les plants au stade de l'initiation de la tubérisation (concomitant avec le débourrement des arbres aux Terres de Roumassouze) réduirait jusqu'à 50% le nombre de tubercules (Chen, 2003). Cet écart en nombre de tubercules par plant pourrait provenir d'une réduction du nombre de stolons observée sous ombrage (O'Brien et al., 1998; Wurr et al., 1997). La tubérisation survient lorsque l'élongation du stolon cesse, au profit d'une croissance radiale. Il a été démontré qu'une accumulation de gibbérellines dans la pointe du stolon favorisait son élongation et, à l'inverse, la diminution des niveaux de GAs dans le stolon favorise sa croissance radiale et la formation d'un tubercule (Xu et al., 1998). La synthèse de GAs étant régie par le phytochrome B et donc par la lumière, la diminution du nombre de tubercules par plant en conditions ombragées pourrait être issu de la surproduction de celles-ci comme l'ont montré plusieurs études (De Lucas et al., 2008; Dutt et al., 2017; García-Martínez & Gil, 2001; Sun, 2010).

Si cette baisse de production était attendue sous ombrage, les résultats indiquent une potentielle meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau en conditions de restrictions hydrique pour la modalité L, ayant reçu près de moitié moins d'eau par rapport aux autres modalités.

b) Qualité des tubercules

La qualité commerciale des tubercules a montré de meilleurs résultats dans les modalités agroforestières. En effet, l'écart de production au contrôle se réduit pour la production commercialisable, aussi cela traduit un meilleur rapport entre le nombre total de tubercules produit et le nombre de tubercules commercialisables, pour la parcelle L notamment (85% des tubercules dans la modalité ELAGUE sont commercialisables, contre 76% en TETARD et 77% en CONTROL). De la même manière, la proportion de tubercules de haute qualité commerciale (classe 1) était la plus élevée en L, suivie de T par rapport au plein soleil. La proportion de tubercules dans la parcelle L est donc de meilleure qualité commerciale concernant l'aspect extérieur.

Par ailleurs, les teneurs en matière sèche des tubercules agroforestiers étaient significativement plus élevées sous couvert agroforestier par rapport au contrôle. Cet écart, bien que de quelques pourcents, pourrait traduire une plus grande quantité de biomasse allouée aux tubercules par rapport à la biomasse aérienne. Ce résultat va à l'encontre de la majorité des études. En effet, une redistribution de la biomasse vers les organes aériens a été documentée pour la pomme de terre sous ombrage dans la littérature scientifique. Dans une étude de Gawronska et al. (1990), une diminution (77% à 94%) de la masse sèche des tubercules lors de la réduction de 75% de la lumière a été observée. D'autres études aboutissent à un constat similaire (Bodlaender, 1963; Demagante & Vander Zaag, 1988; Menzel, 1985; Pardon et al., 2018; Sale, 1973) : le ratio entre les organes aériens et les tubercules augmenterait sous conditions d'ombrage. En particulier, les organes foliaires semblent être les responsables d'un tel basculement dans la répartition de la biomasse (Schulz et al., 2019). Plusieurs pistes de réflexions permettent de justifier notre résultat.

Tout d'abord, la restriction d'irrigation de la modalité ELAGUE pourrait jouer en faveur de cet indicateur, accentuant la concentration en matière sèche dans les tubercules.

D'autre part, l'évolution au cours du temps de la teneur en matière sèche des tubercules a été documentée dans la littérature scientifique et une diminution est visible à partir de 3 mois après plantation (Kolbe & Stephan-Beckmann, 1997), soit avant la récolte. Ainsi, les différences de matière sèche constatées entre nos modalités pourraient provenir du stade de développement plus avancé des plants en plein soleil. Le stade de sénescence ayant été atteint plus rapidement dans la modalité contrôle, la diminution de la matière sèche aurait débuté dans cette modalité et non les autres, ce qui justifierait de telles différences. De plus, la date de récolte ayant été repoussée cette année afin que le stade de sénescence soit majoritairement répandu dans les trois modalités, cela concorderait avec les teneurs en matière sèche trouvées.

Par ailleurs, il a été montré que la teneur en matière sèche des tubercules est négativement corrélée au poids moyen d'un tubercule (ici invariante entre nos modalités) et à la production par plante (Arslan, 2007). Il est possible qu'une plus grande productivité en plein soleil implique une répartition équitable de la matière sèche entre les tubercules et donc une teneur plus faible au global par rapport aux autres modalités. Cette explication fonctionnerait dans l'hypothèse où la même quantité d'assimilats photosynthétiques serait produite dans les trois modalités. En effet, d'après Geremew et al. (2007), l'accumulation de matière sèche dans les tubercules dépendrait directement du coefficient de conversion de l'énergie lumineuse en matière sèche (relation linéaire). Dans l'hypothèse où la compensation à l'ombrage est fonctionnelle et totale dans les modalités agroforestières L et T comme mentionné précédemment, alors la même quantité de matière sèche pourrait être produite et répartie dans les tubercules. Dans ce cas de figure, la modalité contrôle devrait répartir cette matière sèche en plus de tubercules, d'où l'écart observé. Il est toutefois difficile de conclure à une telle hypothèse. En effet, les données de croissance aérienne discutées ci-dessus ne suffisent pas à elles seules pour indiquer une compensation complète de la baisse de radiations photosynthétiques et d'un même taux net de photosynthèse.

D'autres références scientifiques relient la vitesse de croissance et du cycle de développement à la distribution de matière sèche dans les tubercules (Kooman et al., 1996a, 1996b). Aussi, il se pourrait que le léger retard de développement cumulé dans les parcelles agroforestières ait permis à la surface foliaire photosynthétiquement active de photosynthétiser plus longtemps et donc d'accumuler plus d'assimilats dans leurs tissus. Cette hypothèse est également soulevée dans Schulz et al. (2019).

Par ailleurs, le moment au cours duquel l'ombrage est appliqué jouerait également un rôle dans la répartition de la biomasse (Chen, 2003). Une ombre appliquée à l'initiation de la tubérisation induirait une accumulation de la biomasse dans les organes sources (i.e. organes photosynthétiques), aux dépens des organes reproducteurs, les tubercules. Si l'ombre est appliquée lors du grossissement des tubercules, alors le phénomène inverse se produit. Aux Terres de Roumassouze, l'initiation de la tubérisation (concomitante avec la floraison) (Hack et al., 1993), s'est déroulée au mois de mai, lors du débourrement des noyers hybrides. Ainsi, la canopée pas totalement formée aurait permis aux plants de se développer au soleil lors de ce stade crucial. Cependant, ces résultats concernent la biomasse, aussi ils sont à vérifier pour la matière sèche.

L'ensemble des résultats obtenus sur la production de pommes de terre en conditions agroforestières valident en partie l'hypothèse 2 - b) selon laquelle *la présence d'arbres en*

intra parcellaire a un effet négatif sur les rendements en tubercules pour la pomme de terre et notamment pour les teneurs en matière sèche des tubercules via la modification du microclimat. Si l'ombrage affecte indirectement le rendement par l'inhibition de la tubérisation, il semblerait que la pomme de terre développe des mécanismes de compensation, par une croissance aérienne accrue et notamment par l'étalement de sa biomasse photosynthétiquement active. Cette compensation, ajoutée à un retard de développement sous ombrage, aurait contribué à améliorer l'efficacité photosynthétique (matière sèche produite par unité de PAR), aboutissant à une meilleure qualité globale de tubercules et une de meilleures teneurs en matière sèche.

Des travaux de recherche complémentaires sont nécessaires à la quantification de cette potentielle compensation photosynthétique, via l'étude d'indicateurs plus précis comme le rendement net photosynthétique. De même, des mesures de biomasse et de matière sèche de chaque composante des plantes, réalisées à différents stades du cycle de développement permettraient de clarifier la répartition de biomasse dans les différents organes des plants de pommes de terre sous ombrage et les dynamiques temporelles de cette répartition. Ainsi, des stades « critiques » jouant un rôle dans cette répartition et dans la production pourrait être déterminés comme suggéré dans (Kooman et al., 1996b). Par ailleurs, le calcul de l'efficacité d'utilisation de la ressource en eau apporterait des pistes de réflexions concernant la capacité des pommes de terre sous ombrage à mieux utiliser les ressources. Enfin, il serait intéressant de combiner la dynamique de classes de rayonnements au cours de la journée et l'application d'ombrage à différents moments de celle-ci aux données de rendement afin de définir une potentielle conception agroforestière à privilégier.

V. PERSPECTIVES

L'ensemble des résultats obtenus à ce jour dans le cadre du projet ALMANAC (2^e année du projet) ouvre une réflexion quant à la poursuite du projet et de ses thématiques de recherche potentielles. Sa démarche de recherche participative vise à approfondir et produire des connaissances et des références techniques à destination des maraîcher.es, l'idée étant de répondre au mieux aux besoins et interrogations qui leur sont propres. Aussi, l'échelle analytique de la parcelle semble la plus adéquate, étant, de fait, l'échelle d'observation des maraîcher.es.

Si la démarche de recherche participative permet un véritable ancrage à la réalité du terrain, elle implique une variabilité des conditions d'expérimentation, dues aux contraintes à la fois environnementales mais aussi de faisabilité pour les agriculteur.ices. Ainsi, les résultats obtenus dans cette étude sont propres au site des Terres de Roumassouze, et à son contexte. De nombreux facteurs environnementaux, pédoclimatiques, variétaux propre au site d'étude et à la structure du système agroforestier impliquent des biais d'expérimentations et influencent les résultats observés. De fait, ces effets rendent difficile la généralisation de ces résultats. Aussi, une analyse des données à des échelles plus fines, comme celle de la placette par exemple, pourrait réduire l'effet des facteurs mentionnés ci-dessus et caractériser une réponse écophysiological de la pomme de terre à la modification de paramètres microclimatiques spécifiques. Dans ce contexte, une discrimination non pas par modalité mais par taux d'ensoleillement ou températures par placette pourrait être envisagée.

Les dispositifs mis en place cette année visaient à caractériser le microclimat au sein des parcelles agroforestières et à évaluer les performances agronomiques des pommes de terre cultivées sur celles-ci. L'incidence du microclimat sur les performances a pu être établie en tendance mais pour mieux comprendre cette relation, il serait intéressant d'analyser plus finement les paramètres microclimatiques et leurs interdépendances. En particulier, un potentiel effet de l'ombrage sur la température et l'humidité du sol pourrait, via la modification de ces éléments, influencer sur le développement, la croissance de la pomme de terre et indirectement sa production.

Si les résultats présentés dans cette étude ont surtout permis d'évaluer un effet d'ombrage sur les performances agronomiques des pommes de terre, des besoins de recherche similaires concernant la ressource en eau ont été mis en évidence (Jose, 2000). Le climat au cours de la saison (importante pluviométrie) combiné au contexte pédologique du site de Roumassouze (nappe phréatique peu profonde, cours d'eau en contrebas) et à l'irrigation des pommes de terre), a réduit les chances d'observer une telle compétition entre les cultures et les arbres. Aussi, il serait d'un grand intérêt d'observer le comportement de pommes de terre en agroforesterie en conditions non irriguées, ou de stress hydrique, la disponibilité en eau étant amenée à diminuer en région méditerranéenne. Les résultats indiquent une potentielle meilleure utilisation de l'eau en agroforesterie, aussi l'analyse de la performance globale de l'irrigation des systèmes agroforestiers par rapport à une culture en plein soleil pourrait participer à minimiser les pertes en eau et anticiper de potentielles sécheresses à l'avenir. En outre, l'étude de l'effet des différences de taille sur le réseau racinaire des arbres et leur approvisionnement en nutriments et eau compléterait cette piste de réflexion.

Dans le cadre du travail mené, seule la variété Charlotte a été présentée. Toutefois, la variété Désirée, suivie sur l'un des sites dans le Vaucluse (résultats non présentés), a donné à voir des différences inter-variétales en termes de performances agronomiques et de réponses écophysiologiques à l'ombrage. La croissance et le développement de la variété Désirée notamment ont été fortement impactés par l'ombrage. Ainsi, à la lumière des résultats obtenus sur la variété Charlotte, l'étude de variétés tardives ou sensibles à l'ombrage comme la Désirée ouvrirait de nouvelles perspectives de choix variétaux pour la poursuite du projet. Une piste de réflexion sur le potentiel agronomique de variétés tardives à cycle long, comme une forme de compensation à la réduction lumineuse (Kooman et al., 1996a; Schulz et al., 2019) mériterait d'être approfondie. Aussi, l'implantation de plusieurs variétés sur un même site et sur une même parcelle agroforestière pourrait être préconisé. De plus, cette approche donnerait aux agriculteur.ices des clés quant à la sélection de la variété la plus adaptée à leur contexte.

Par ailleurs, il est important de rappeler que ce projet s'adresse aux agriculteur.ices installés en maraîchage biologique diversifié. Aussi, il est courant sur les sites expérimentaux que la récolte se fasse en différée afin d'écouler la production progressivement au cours de la saison. C'est pourquoi l'étude de la pomme de terre et notamment de sa production au cours du temps après la récolte ouvrirait des pistes d'analyses plus adaptées à la réalité commerciale.

D'autre part, un échange avec des maraîcher.es agroforestiers complété par une veille scientifique permettrait de sélectionner de nouvelles espèces maraîchères pour la suite des expérimentations. Les suivis complémentaires réalisés sur les cultures de salades et oignons ont donné à voir des réponses diverses et fortes à l'ombrage. La croissance des plants et le calibre des oignons particulièrement semblaient impactés par l'ombrage. López-Marín et al. (2012), ont démontré le potentiel agronomique du poivron cultivé sous serre et sous ombrage (40-60%) en zone méditerranéenne. Un précédent projet porté par AGROOF sur la culture de la tomate (*Agroforesterie et maraîchage - ARBRATATOUILLE*, 2014) démontre une production plus faible sous ombrage, mais de meilleure qualité commerciale et de qualité physico-chimique équivalente sous 40% d'ombrage. La sélection de nouvelles espèces maraîchères devra être issue d'une concertation avec les maraîcher.es mais aussi de la demande et des attentes de la clientèle.

Le projet ALMANAC donne à la SCOP AGROOF des éléments clés concernant la conception et la gestion de systèmes agroforestiers en climat méditerranéen pour les cultures maraîchères étudiées. Ces résultats, cumulés à des savoirs empiriques, permettent une conception plus fine de tels systèmes. L'influence des modalités de taille des arbres par exemple ouvre des perspectives quant à la gestion de l'ouverture de la canopée en système agroforestier. Le suivi d'autres sites expérimentaux dans le Vaucluse a permis d'accumuler des données sur des vergers maraîchers notamment et le comportement des cultures dans ce contexte. Néanmoins, l'acquisition de ces connaissances dans une grande diversité d'environnements consoliderait l'expertise de structures accompagnant la conception de projets agroforestiers. C'est pourquoi une perspective pour le projet ALMANAC serait la création d'un réseau national de recherche participative, permettant la mise en commun de sites agroforestiers et des données les concernant. Cette approche donnerait à voir la diversité des systèmes agroforestiers et des réponses écophysiologiques possibles dans différents contextes pédoclimatiques et donnerait une idée plus concise de la gestion de tels systèmes de production.

CONCLUSION

Le maraîchage biologique diversifié sur petite surface fait face à de nombreux défis technico économiques, environnementaux et climatiques en région méditerranéenne. Aussi, un enjeu actuel est de concevoir, développer et diffuser de nouveaux systèmes de cultures plus à même de répondre à ces problématiques. L'agroforesterie en particulier, pour ses processus de facilitation potentiels, serait un levier d'adaptation à ces enjeux contemporains. Malgré la conception et le développement de plus en plus fréquents de tels systèmes, les références techniques et scientifiques viennent à manquer sur le comportement des cultures maraîchères en agroforesterie.

L'objectif de ce travail était d'évaluer et comprendre l'effet de la présence d'arbres adultes en agroforesterie maraîchère sur les performances agronomiques de la culture de la pomme de terre en région méditerranéenne. Cette étude s'insère dans la deuxième année de relevés du projet ALMANAC et fait suite à de précédents projets de recherche portés par AGROOF et menés sur la tomate notamment. Elle vise à mieux comprendre les mécanismes sous-jacents des interactions entre arbres et cultures afin de fournir aux structures techniques d'accompagnement et aux agriculteur.ices des références propre à leur contexte géographique. Lors de cette 2^e année d'expérimentation, afin de conserver une continuité dans les suivis de l'année précédente, l'accent a été porté sur la culture de la pomme de terre, de la variété Charlotte notamment (implantée sur 2 des 3 sites pilotes) et afin d'explorer plus en détails les mécanismes en place, seul le site des Terres de Roumassouze a été présenté.

Les résultats ont montré un effet de la présence des arbres sur le microclimat des parcelles, directement dépendant à la modalité de taille et distance-dépendant aux arbres. Les réponses écophysologiques de la culture de pomme de terre sont de plusieurs ordres et semble provenir de la modification des paramètres microclimatiques. Des mécanismes de compensation à l'ombrage ont été développés par les plantes. Une croissance étiolée ainsi qu'un étalement de la biomasse ont pu être démontrés, optimisant ainsi l'utilisation de la lumière et potentiellement le processus de photosynthèse. La production s'est révélée être inférieure dans les parcelles agroforestières, néanmoins la qualité des tubercules (commerciale et teneurs en matière sèche) s'est avérée être meilleure en particulier pour la modalité la plus ombragée.

L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de cette étude met en avant la complexité des interactions entre arbres et cultures maraîchères. Divers processus, de compétition comme de facilitation, apportés par les arbres ont été mis en évidence, mais aussi la capacité d'adaptation des plants à l'agroforesterie par leur plasticité phénotypique et leur efficience d'utilisation des ressources, accentuée en ce contexte. Toutefois, l'échelle d'analyse du système de culture ne permet pas une compréhension fine de ces processus. Cette étude motive donc la poursuite des recherches sur d'autres espèces maraîchères et sur le fonctionnement des systèmes agroforestiers maraîchers en zone méditerranéenne pour accompagner le développement, l'amélioration et l'adaptation des systèmes de cultures maraîchers au changement climatique. La mise en pratique d'expérimentations visant à évaluer le potentiel de l'agroforesterie à optimiser ou non la ressource en eau devrait être développée, d'autant que la région méditerranéenne est amenée à subir des épisodes de sécheresses à l'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdrabbo, M., Farag, A., & Abulsoud, M. (2013). The Intercropping Effect on Potato under Net House as Adaption Procedure of Climate Change Impacts. *Researcher*, 5, 48-60.
- Agence Bio. (2024). *Barometre consommateur-2024-rapport complet*. Disponible à l'adresse : https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2024/03/Barometre-consommateur-2024-rapport-complet_Agence-Bio_LObSoCo.pdf
- Agroforesterie et maraîchage—ARBRATATOUILLE*. (2014, 2020). Disponible à l'adresse : <https://arbratatouille.projet-agroforesterie.net/index.html>
- Anderson, S. H., Udawatta, R. P., Seobi, T., & Garrett, H. E. (2009). Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry Systems*, 75(1), 5-16. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9128-3>
- Arslan, B. (2007). Relationships Among Yield and Some Yield Characters in Potato (*S. tuberosum* L.). *Journal of Biological Sciences*, 7(6), 973-976. <https://doi.org/10.3923/jbs.2007.973.976>
- Bai, W., Sun, Z., Zheng, J., Du, G., Feng, L., Cai, Q., Yang, N., Feng, C., Zhang, Z., Evers, J. B., Van Der Werf, W., & Zhang, L. (2016). Mixing trees and crops increases land and water use efficiencies in a semi-arid area. *Agricultural Water Management*, 178, 281-290. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.007>
- Barradas, V. L., & Fanjul, L. (1986). Microclimatic chacterization of shaded and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38(1-3), 101-112. Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(86\)90052-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(86)90052-3)
- Barrera-Escoda, A., Gonçalves Ageitos, M., Guerreiro, D., Cunillera, J., & Baldasano, J. (2014). Projections of temperature and precipitation extremes in the North Western Mediterranean Basin by dynamical downscaling of climate scenarios at high resolution (1971–2050). *Climatic Change*, 122, 567-582. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1027-6>
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., & Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. In P. K. R. Nair & C. R. Latt (Éds.), *Directions in Tropical Agroforestry Research* (Vol. 53, p. 139-164). Springer Netherlands. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-94-015-9008-2_6
- Beral, C., Martin-Chave, A., & Liagre, F. (2019). Agroforestry impacts tomatoes production in a vegetable organic alley cropping temperate system. *Regular talk 4th World Congress on Agroforestry*.
- Bisbis, M. B., Gruda, N., & Blanke, M. (2018). Potential impacts of climate change on vegetable production and product quality – A review. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1602-1620. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.224>
- Blanchet, G., Barkaoui, K., Bradley, M., Dupraz, C., & Gosme, M. (2022). Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea grown in a 25-year-old walnut-based alley cropping system. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(5), 583-598. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1111/jac.12488>
- Bodlaender, K. B. A. (1963). *Influence of temperature, radiation, and photoperiod on development and yield*.
- Böhm, C., Kanzler, M., & Freese, D. (2014). Wind speed reductions as influenced by woody hedgerows grown for biomass in short rotation alley cropping systems in Germany. *Agroforestry Systems*, 88(4), 579-591. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9700-y>
- Caloiero, T., Veltri, S., Caloiero, P., & Frustaci, F. (2018). Drought Analysis in Europe and in the Mediterranean Basin Using the Standardized Precipitation Index. *Water*, 10(8), 1043. Disponible à

l'adresse : <https://doi.org/10.3390/w10081043>

Cannavo, P., Sansoulet, J., Harmand, J.-M., Siles, P., Dreyer, E., & Vaast, P. (2011). Agroforestry associating coffee and *Inga densiflora* results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(1-2), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.005> Disponible à l'adresse :

Cardinael, R., Cadisch, G., Gosme, M., Oelbermann, M., & Van Noordwijk, M. (2021). Climate change mitigation and adaptation in agriculture: Why agroforestry should be part of the solution. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 319, 107555. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107555>

Cardinael, R., Chevallier, T., Barthès, B. G., Saby, N. P. A., Parent, T., Dupraz, C., Bernoux, M., & Chenu, C. (2015). Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon—A case study in a Mediterranean context. *Geoderma*, 259-260, 288-299. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.015>

Cardinael, R., Mao, Z., Prieto, I., Stokes, A., Dupraz, C., Kim, J. H., & Jourdan, C. (2015). Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system. *Plant and Soil*, 391(1-2), 219-235. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2422-8>

Chambre Régionale d'Agriculture Occitanie et CERFRANCE Occitanie. (2023). *Agri'Scopie Occitanie*.

Chaouche, K., Neppel, L., Dieulin, C., Pujol, N., Ladouche, B., Martin, E., Salas, D., & Caballero, Y. (2010). Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(3), 234-243. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.02.001>

CHARLOTTE Pomme de terre : Précocité Mildiou Rendement, Résultats ARVALIS. (s. d.). Les Fiches ARVALIS. Consulté 12 Juin 2024, à l'adresse https://fiches.arvalis-infos.fr/fiche_variete/fiches_varietes.php?mode=fv&id_espece=001&id_variete=79

Chen, C. (2003). Response of Potato Tuber Cell Division and Growth to Shade and Elevated CO₂. *Annals of Botany*, 91(3), 373-381. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1093/aob/mcg031>

Chiffot, V., Rivest, D., Olivier, A., Cogliastro, A., & Khasa, D. (2009). Molecular analysis of arbuscular mycorrhizal community structure and spores distribution in tree-based intercropping and forest systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(1-2), 32-39. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.11.010>

CNIPT, Comité National Interprofessionnel de la Pomme de Terre. (1997, mars 26). *Commerce de pommes de terre de primeur et des pommes de terre de conservation, arrêté du 3 mars 1997*.

College of Horticulture, Agricultural University of Hebei, Baoding, China, Nie, L. C., Chen, Y. H., College of Horticulture, Agricultural University of Hebei, Baoding, China, Liu, M., & College of Horticulture, Agricultural University of Hebei, Baoding, China. (2016). Effects of low temperature and chilling duration on bud break and changes of endogenous hormones of asparagus. *European Journal of Horticultural Science*, 81(1), 22-26. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.17660/eJHS.2016/81.1.3>

De Lucas, M., Davière, J.-M., Rodríguez-Falcón, M., Pontin, M., Iglesias-Pedraz, J. M., Lorrain, S., Fankhauser, C., Blázquez, M. A., Titarenko, E., & Prat, S. (2008). A molecular framework for light and gibberellin control of cell elongation. *Nature*, 451(7177), 480-484. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1038/nature06520>

Demagante, A. L., & Vander Zaag, P. (1988). The response of potato (*Solanum* spp.) to photoperiod and light intensity under high temperatures. *Potato Research*, 31(1), 73-83. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/BF02360023>

Dubrovský, M., Hayes, M., Duce, P., Trnka, M., Svoboda, M., & Zara, P. (2014). Multi-GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region. *Regional Environmental Change*, 14(5), 1907-1919. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0562-z>

Dutt, S., Manjul, A. S., Raigond, P., Singh, B., Siddappa, S., Bhardwaj, V., Kavar, P. G., Patil, V. U., & Kardile, H. B. (2017). Key players associated with tuberization in potato : Potential candidates for genetic engineering. *Critical Reviews in Biotechnology*, 37(7), 942-957. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1080/07388551.2016.1274876>

Ewing, E. E., & Wareing, P. F. (1978). Shoot, Stolon, and Tuber Formation on Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cuttings in Response to Photoperiod. *Plant Physiology*, 61(3), 348-353. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1104/pp.61.3.348>

FAOSTAT. (2024, mai 7). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/TCL>

García-Martínez, J. L., & Gil, J. (2001). Light Regulation of Gibberellin Biosynthesis and Mode of Action. *Journal of Plant Growth Regulation*, 20(4), 354-368. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s003440010033>

Gawronska, H., Dwelle, R. B., & Pavek, J. J. (1990). Partitioning of photoassimilates by potato plants (*Solanum tuberosum* L.) as influenced by irradiance : II. Partitioning patterns by four clones grown under high and low irradiance. *American Potato Journal*, 67(3), 163-176. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/BF02987069>

Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., Vitaliotou, M., Lalas, D. P., Theloudis, I., Giannoulaki, K.-D., Dimopoulos, D., & Zavras, V. (2017). Climate change impacts and adaptation options for the Greek agriculture in 2021–2050 : A monetary assessment. *Climate Risk Management*, 16, 164-182. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.002>

Geremew, E. B., Steyn, J. M., & Annandale, J. G. (2007). Evaluation of growth performance and dry matter partitioning of four processing potato (*Solanum tuberosum*) cultivars. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 35(3), 385-393. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1080/01140670709510204>

Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8), 2006GL025734. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>

Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 90-104. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>

Gomes, L. C., Bianchi, F. J. J. A., Cardoso, I. M., Fernandes, R. B. A., Filho, E. I. F., & Schulte, R. P. O. (2020). Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production : A spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 294, 106858. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858>

Gravouelle, J. M. (2011, mars 29). *Croissance et tubérisation - Feuillage : Des sensibilités différentes à la lumière*. ARVALIS. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/guide-de-production-de-la-pomme-de-terre-0>

Hack et al. (1993). *Echelle BBCH des stades phénologiques de la pomme de terre*.

Hancock, R. D., Morris, W. L., Ducreux, L. J. M., Morris, J. A., Usman, M., Verrall, S. R., Fuller, J., Simpson, C. G., Zhang, R., Hedley, P. E., & Taylor, M. A. (2014). Physiological, biochemical and molecular responses of the potato (*Solanum tuberosum* L.) plant to moderately elevated temperature. *Plant, Cell & Environment*, 37(2), 439-450. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1111/pce.12168>

Hullé, M., Cœur d'Acier, A., Bankhead-Dronnet, S., & Harrington, R. (2010). Aphids in the face of global changes. *Comptes Rendus. Biologies*, 333(6-7), 497-503. Disponible à l'adresse :

<https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.03.005>

Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc). (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1^{re} éd.). Cambridge University Press. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Jackson, S. D., Heyer, A., Dietze, J., & Prat, S. (1996). Phytochrome B mediates the photoperiodic control of tuber formation in potato. *The Plant Journal*, 9(2), 159-166. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1996.09020159.x>

Jose. (2000). *Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 2. Competition for water*.

Jose, S., Gillespie, A. R., & Pallardy, S. G. (2004). Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, 61-62(1-3), 237-255. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029002.85273.9b>

Kandji, S., & Verchot, L. V. (2006). Opportunities for linking climate change adaptation and mitigation through agroforestry systems. In *World Agroforestry into the Future*. Disponible à l'adresse : <https://apps.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/bc06137.pdf>

Kolbe, H., & Stephan-Beckmann, S. (1997). *Development, growth and chemical composition of the potato crop (Solanum tuberosum L.). II. Tuber and whole plant*.

Kooman, P. L., Fahem, M., Tegera, P., & Haverkort, A. J. (1996a). Effects of climate on different potato genotypes 1. Radiation interception, total and tuber dry matter production. *European Journal of Agronomy*, 5(3-4), 193-205. Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(96\)02031-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(96)02031-X)

Kooman, P. L., Fahem, M., Tegera, P., & Haverkort, A. J. (1996b). Effects of climate on different potato genotypes 2. Dry matter allocation and duration of the growth cycle. *European Journal of Agronomy*, 5(3-4), 207-217. Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(96\)02032-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(96)02032-1)

Köppen, W. (1900). *Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt*. 593-611.

Kuruppuarachchi, D. S. P. (1990). Intercropped potato (*Solanum spp.*): Effect of shade on growth and tuber yield in the northwestern regosol belt of Sri Lanka. *Field Crops Research*, 25(1-2), 61-72. Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(90\)90072-J](https://doi.org/10.1016/0378-4290(90)90072-J)

Lasco, R. D., Delfino, R. J. P., & Espaldon, M. L. O. (2014). Agroforestry systems: Helping smallholders adapt to climate risks while mitigating climate change. *WIREs Climate Change*, 5(6), 825-833. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1002/wcc.301>

Le Projet SMART. (2016, septembre 10). Grab. <https://www.grab.fr/le-projet-smart/>

Liagre, F., & Dupraz, C. (2019). *Agroforesterie – Des arbres et des cultures* (La France Agricole).

Lin, B. B. (2007). Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1-2), 85-94. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.009>

Lin, B. B. (2010). The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4), 510-518. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.010>

López-Marín, J., Gálvez, A., González, A., Egea-Gilabert, C., & Fernández, J. A. (2012). EFFECT OF SHADE ON YIELD, QUALITY AND PHOTOSYNTHESIS-RELATED PARAMETERS OF SWEET PEPPER PLANTS. *Acta Horticulturae*, 956, 545-552. Disponible à l'adresse :

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.65>

Lovell, S. T., Dupraz, C., Gold, M., Jose, S., Revord, R., Stanek, E., & Wolz, K. J. (2018). Temperate agroforestry research : Considering multifunctional woody polycultures and the design of long-term field trials. *Agroforestry Systems*, 92(5), 1397-1415. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0087-4>

Mariana, M., & Hamdani, J. S. (2016). Growth and Yield of *Solanum Tuberosum* at Medium Plain with Application of Paclobutrazol and Paranet Shade. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 9, 26-30. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.117>

Martin-Chave, A. (2018). *Facteurs de régulation naturelle des bio-agresseurs par les cortèges de prédateurs généralistes: Effets microclimatiques dans un système maraîcher agroforestier biologique*.

MedECC. (2020). *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report (Version 1)*. Zenodo. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7224821>

Menzel, C. M. (1985). Tuberization in Potato at High Temperatures : Interaction between Temperature and Irradiance. *Annals of Botany*, 55(1), 35-39. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086875>

Michaelides, S., Karacostas, T., Sánchez, J. L., Retalis, A., Pytharoulis, I., Homar, V., Romero, R., Zanis, P., Giannakopoulos, C., Bühl, J., Ansmann, A., Merino, A., Melcón, P., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bruggeman, A., López-Moreno, J. I., Berthet, C., Katragkou, E., ... Nisantzi, A. (2018). Reviews and perspectives of high impact atmospheric processes in the Mediterranean. *Atmospheric Research*, 208, 4-44. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.022>

Ministère de l'agriculture. (2023, septembre 29). *Présentation du « Pacte en faveur de la haie » doté d'un budget de 110 M€ dès 2024*. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. <https://agriculture.gouv.fr/presentation-du-pacte-en-faveur-de-la-haie-dote-dun-budget-de-110-meu-des-2024>

Ministère de l'Agriculture. (2023, octobre 5). *L'agroforesterie en France*. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. <https://agriculture.gouv.fr/lagroforesterie-en-France>

O'Brien, P. J., Firman, D. M., & Allen, E. J. (1998). Effects of shading and seed tuber spacing on initiation and number of tubers in potato crops (*Solanum tuberosum*). *The Journal of Agricultural Science*, 130(4), 431-449. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1017/S0021859698005541>

Pardon, P., Reubens, B., Mertens, J., Verheyen, K., De Frenne, P., De Smet, G., Van Waes, C., & Reheul, D. (2018). Effects of temperate agroforestry on yield and quality of different arable intercrops. *Agricultural Systems*, 166, 135-151. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.08.008>

Pardon, P., Reubens, B., Reheul, D., Mertens, J., De Frenne, P., Coussement, T., Janssens, P., & Verheyen, K. (2017). Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 247, 98-111. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.018>

Paut, R., Sabatier, R., & Tchamitchian, M. (2019). Reducing risk through crop diversification : An application of portfolio theory to diversified horticultural systems. *Agricultural Systems*, 168, 123-130. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.11.002>

Paut, R., Sabatier, R., & Tchamitchian, M. (2020). Modelling crop diversification and association effects in agricultural systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 288, 106711. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106711>

Peng, X., Zhang, Y., Cai, J., Jiang, Z., & Zhang, S. (2009). Photosynthesis, growth and yield of

soybean and maize in a tree-based agroforestry intercropping system on the Loess Plateau. *Agroforestry Systems*, 76(3), 569-577. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9227-9>

Pleijel, H., Danielsson, H., Vandermeiren, K., Blum, C., Colls, J., & Ojanperä, K. (2002). Stomatal conductance and ozone exposure in relation to potato tuber yield—Results from the European CHIP programme. *European Journal of Agronomy*, 17(4), 303-317. Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00068-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00068-0)

Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I. J., & Villar, R. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): A meta-analysis. *New Phytologist*, 182(3), 565-588. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x>

Potop, V., Možný, M., & Soukup, J. (2012). Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 121-133. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.002>

Potopová, V., Štěpánek, P., Farda, A., Türkott, L., Zahradníček, P., & Soukup, J. (2016). Drought stress impact on vegetable crop yields in the Elbe River lowland between 1961 and 2014. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), Article 1. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.18172/cig.2924>

Putz, B. (1989). *Kartoffeln : Züchtung, Anbau, Verwertung*. Behr's.

Quandt, A., Neufeldt, H., & Gorman, K. (2023). Climate change adaptation through agroforestry: Opportunities and gaps. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 60, 101244. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101244>

Quinkenstein, A., Wöllecke, J., Böhm, C., Grünewald, H., Freese, D., Schneider, B. U., & Hüttl, R. F. (2009). Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe. *Environmental Science & Policy*, 12(8), 1112-1121. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.08.008>

Ramachandran Nair, P. K., Nair, V. D., Mohan Kumar, B., & Showalter, J. M. (2010). Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. In *Advances in Agronomy* (Vol. 108, p. 237-307). Elsevier. Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)

Ramananjatovo, T., Chantoiseau, E., Guillermin, P., Guénon, R., Delaire, M., Buck-Sorlin, G., & Cannavo, P. (2021). Growth of Vegetables in an Agroecological Garden-Orchard System : The Role of Spatiotemporal Variations of Microclimatic Conditions and Soil Properties. *Agronomy*, 11(9), 1888. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.3390/agronomy11091888>

Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., & Habib, R. (2012). Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems : A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 273-303. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0022-4>

Raymond, F., Ullmann, A., Trambly, Y., Drobinski, P., & Camberlin, P. (2019). Evolution of Mediterranean extreme dry spells during the wet season under climate change. *Regional Environmental Change*, 19(8), 2339-2351. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01526-3>

Rey, F., Coulombel, A., Jobbé-Duval, M., Melliand, M. L., Jonis, M., & Conseil, M. (2015). *Guide technique : « Produire des légumes biologiques », Tome 2 : Fiches techniques par légume*, ITAB (2017^e éd.).

Reyes, F., Gosme, M., Wolz, K. J., Lecomte, I., & Dupraz, C. (2021). Alley Cropping Mitigates the Impacts of Climate Change on a Wheat Crop in a Mediterranean Environment : A Biophysical Model-Based Assessment. *Agriculture*, 11(4), Article 4. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.3390/agriculture11040356>

Rykaczewska, K. (2015). The Effect of High Temperature Occurring in Subsequent Stages of Plant Development on Potato Yield and Tuber Physiological Defects. *American Journal of Potato Research*, 92(3), 339-349. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s12230-015-9436-x>

Sale, P. (1973). Productivity of vegetable crops in a region of high solar input. II. Yields and efficiencies of water use and energy. *Australian Journal of Agricultural Research*, 24(5), 751. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1071/AR9730751>

Savé, R., De Herralde, F., Aranda, X., Pla, E., Pascual, D., Funes, I., & Biel, C. (2012). Potential changes in irrigation requirements and phenology of maize, apple trees and alfalfa under global change conditions in Fluvia watershed during XXIst century: Results from a modeling approximation to watershed-level water balance. *Agricultural Water Management*, 114, 78-87. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.07.006>

Schulz, V. S., Munz, S., Stolzenburg, K., Hartung, J., Weisenburger, S., & Graeff-Hönniger, S. (2019). Impact of Different Shading Levels on Growth, Yield and Quality of Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomy*, 9(6), 330. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.3390/agronomy9060330>

Seabrook, J. E. A. (2005). Light effects on the growth and morphogenesis of potato (*Solanum tuberosum*) in vitro : A review. *American Journal of Potato Research*, 82(5), 353-367. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/BF02871966>

Sereke, F., Graves, A. R., Dux, D., Palma, J. H. N., & Herzog, F. (2015). Innovative agroecosystem goods and services: Key profitability drivers in Swiss agroforestry. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 759-770. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0261-2>

Sollen-Norrlin, M., Ghaley, B. B., & Rintoul, N. L. J. (2020). Agroforestry Benefits and Challenges for Adoption in Europe and Beyond. *Sustainability*, 12(17), 7001. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.3390/su12177001>

Stamps, W. T., & Linit, M. J. (1997). Plant diversity and arthropod communities : Implications for temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, 39(1), 73-89. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1023/A:1005972025089>

Struik, P. C., Haverkort, A. J., Vreugdenhil, D., Bus, C. B., & Dankert, R. (1990). Manipulation of tuber-size distribution of a potato crop. *Potato Research*, 33(4), 417-432. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/BF02358019>

Sun, T. (2010). Gibberellin-GID1-DELLA : A Pivotal Regulatory Module for Plant Growth and Development. *Plant Physiology*, 154(2), 567-570. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1104/pp.110.161554>

Tian, S., Cacho, J. F., Youssef, M. A., Chescheir, G. M., Fischer, M., Nettles, J. E., & King, J. S. (2017). Switchgrass growth and pine-switchgrass interactions in established intercropping systems. *GCB Bioenergy*, 9(5), 845-857. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1111/gcbb.12381>

Timlin, D., Lutfur Rahman, S. M., Baker, J., Reddy, V. R., Fleisher, D., & Quebedeaux, B. (2006). Whole Plant Photosynthesis, Development, and Carbon Partitioning in Potato as a Function of Temperature. *Agronomy Journal*, 98(5), 1195-1203. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0260>

Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J. H. C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B. B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., ... Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428(6985), 821-827. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1038/nature02403>

Wurr, D. C. E., Hole, C. C., Fellows, J. R., Milling, J., Lynn, J. R., & O'Brien, P. J. (1997). The effect of some environmental factors on potato tuber numbers. *Potato Research*, 40(3), 297-306.

Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/BF02358011>

Xiao, G., Zheng, F., Qiu, Z., & Yao, Y. (2013). Impact of climate change on water use efficiency by wheat, potato and corn in semiarid areas of China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 181, 108-114. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.019>

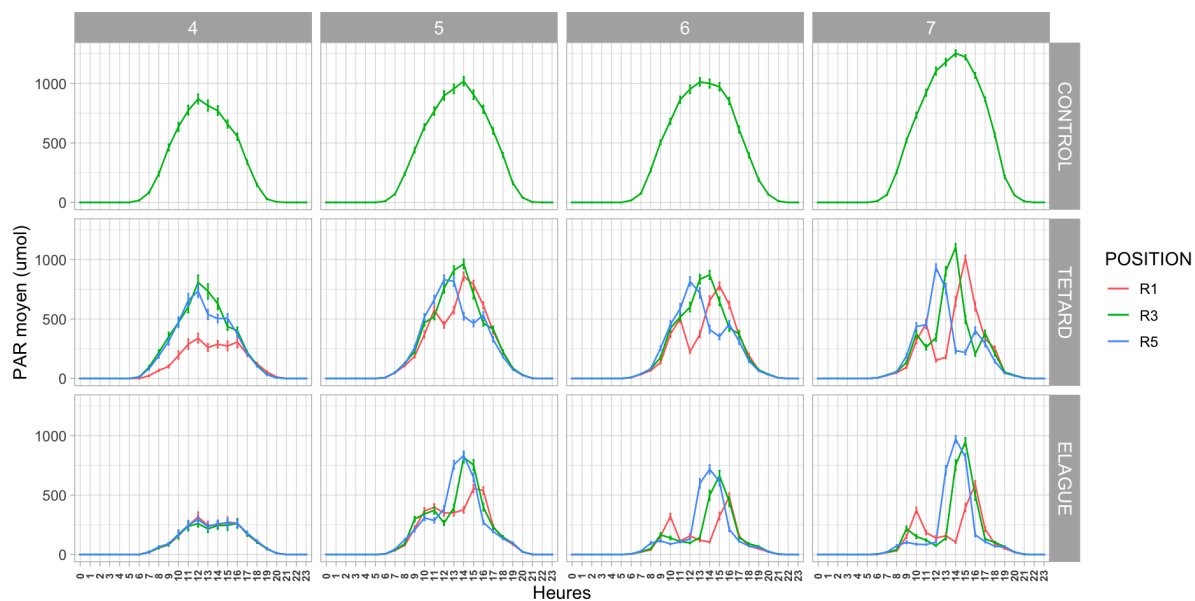
Xu, X., Van Lammeren, A. A. M., Vermeer, E., & Vreugdenhil, D. (1998). The Role of Gibberellin, Absciscic Acid, and Sucrose in the Regulation of Potato Tuber Formation in Vitro1. *Plant Physiology*, 117(2), 575-584. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1104/pp.117.2.575>

Zhao, G., Webber, H., Hoffmann, H., Wolf, J., Siebert, S., & Ewert, F. (2015). The implication of irrigation in climate change impact assessment: A European-wide study. *Global Change Biology*, 21(11), 4031-4048. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1111/gcb.13008>

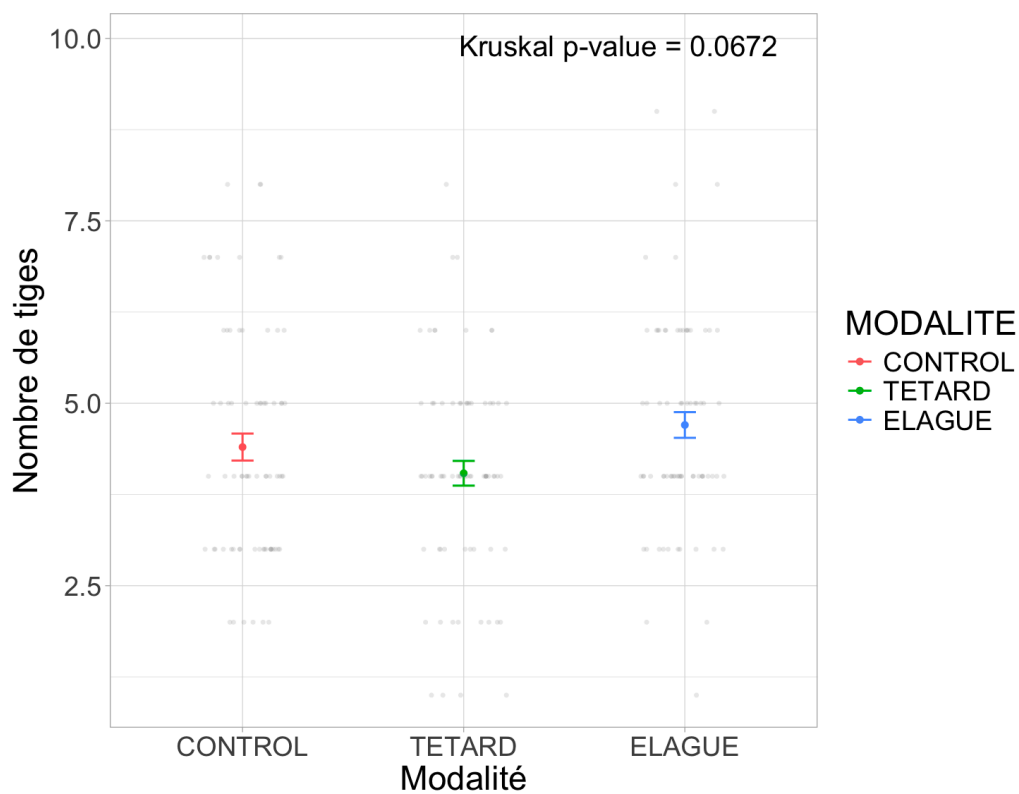
Zhao, Y., Zhang, B., & Hill, R. (2012). Water use assessment in alley cropping systems within subtropical China. *Agroforestry Systems*, 84(2), 243-259. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9458-4>

Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Klangidou, M., Proestos, Y., & Lelieveld, J. (2019). A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, 19(8), 2621-2635. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01565-w>

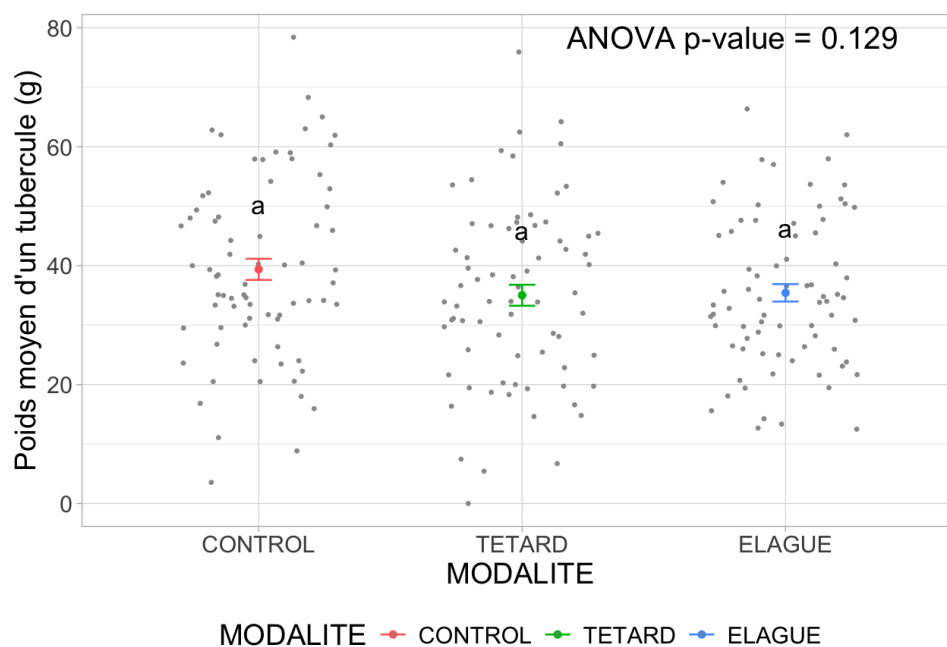
ANNEXES



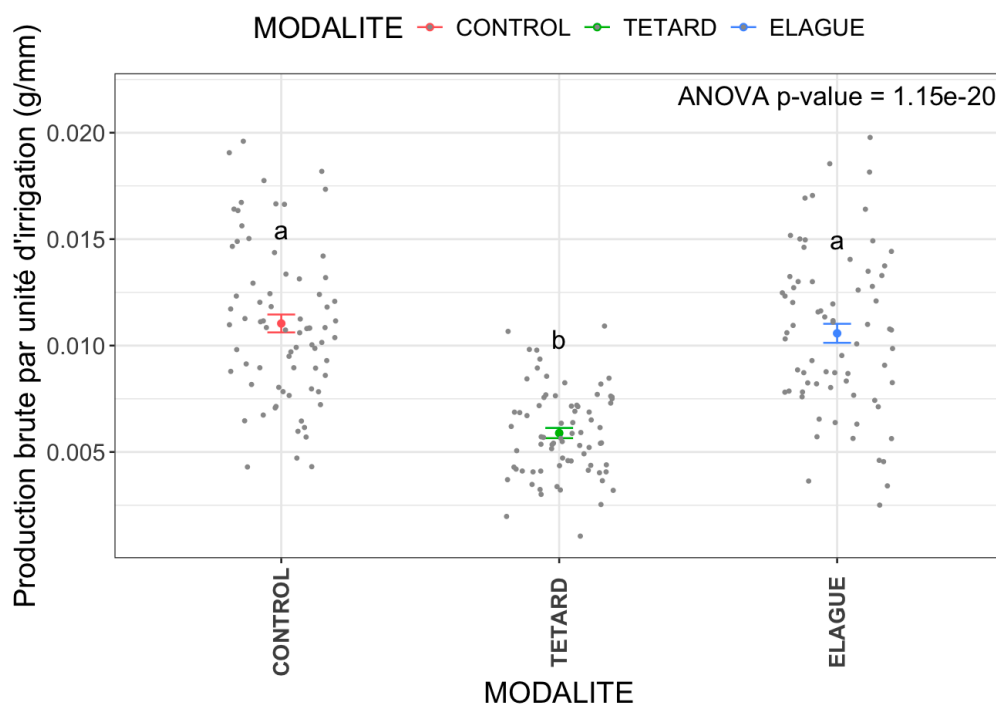
Annexe 1. Évolution du PAR par rang et modalité au cours de la campagne. Barres d'erreur = intervalle de confiance (95%).



Annexe 2. Nombre de tiges moyen par plant au 13 juin 2024. Test non paramétrique de Kruskal-Wallis $\alpha = 5\%$. Moyennes $\pm$ erreur standard.



Annexe 3. Poids moyen de tubercule par modalité. ANOVA à 1 facteur, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Tukey. Moyennes $\pm$ erreur standard.



Annexe 4. Production brute par unité d'irrigation (g/mm) par modalité. ANOVA à 1 facteur, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Tukey. Moyennes $\pm$ erreur standard.

ABSTRACT

Global warming is one of the main challenges facing the agricultural sector. In the Mediterranean region and especially for small, biological, and diversified vegetable production farms, climate change predictions are pushing us to reconsider our cropping systems. New resilient cropping systems, whose input needs are low, must be designed. Agroforestry, in its various forms, is a potential lever for meeting such challenges.

The ALMANAC project aims to acquire knowledge and scientific references on the behaviour of market gardening in agroforestry for the benefit of farmers. This study complements the research work carried out in 2023 as part of an initial survey campaign. The objective of this work is to assess the agronomic performance of potatoes (*Solanum tuberosum*) in market garden agroforestry in the Mediterranean region. To this end, experiments were performed in three agroforestry sites in the Gard and Vaucluse departments by using a participatory approach. Here, we only present the results for the Terres de Roumassouze (Gard) site.

The experiments were carried out on agroforestry plots combining hybrid walnut trees (*Juglans regia* x *Juglans nigra*) and a potato intercrop (Charlotte var.). Three different shade levels were studied: C (full sun control, 0% shade); T (43% shade); L (62% shade). On these plots, growth, development, raw and marketable yield and tubers quality were monitored regularly. These measurements were related to the microclimate (photosynthetically active radiation - PAR; temperature; hygrometry) of each plot.

The results show a buffering effect of temperature and humidity. The potato plants were taller, and their shoot biomass more spread out under 62% shade. A delay in the development was observed in the shaded conditions compared with the control, particularly in the initiation of flowering and senescence stages. Decreases in production were observed in the shaded conditions compared with full sun, although the tubers were proportionally of better commercial quality in the shaded conditions. Finally, under the highest shade level, the tubers produced had significantly higher dry matter contents than the other conditions.

These results suggest that the potato has the capacity to adapt to shading by developing an ecophysiological response to compensate light resources reduction (etiolated growth). The reduction in radiation under the agroforestry canopy had a negative impact on production, however the delay in development observed and the compensation mechanisms could have resulted in better quality production.

This study supports the potential of agroforestry to meet the challenges of global warming in the Mediterranean zone and highlights certain mechanisms that ensure the optimisation of natural resources such as light and the intensification of potato production under walnut trees.

RÉSUMÉ

Le réchauffement climatique est l'un des principaux défis auquel doit faire face le secteur agricole. En région méditerranéenne et particulièrement pour les activités en maraîchage biologique diversifié, les prévisions climatiques incitent à envisager de nouveaux systèmes de culture, résilients par leur diversité et économes en intrants notamment en eau. L'agroforesterie sous ses diverses formes se positionne comme un levier de développement potentiel pour répondre à ces enjeux.

Le projet ALMANAC vise à acquérir des connaissances et références scientifiques quant au comportement de cultures maraîchères en agroforesterie à destination des agriculteur.ices. Cette étude vient compléter les travaux de recherche menés en 2023 dans le cadre d'une première campagne de relevés. L'objectif de ce travail est d'évaluer les performances agronomiques de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) en agroforesterie maraîchère en région méditerranéenne. Pour ce faire, trois sites agroforestiers dans le Gard et le Vaucluse ont fait l'objet d'expérimentations dans une démarche participative. Ici, seuls les résultats concernant le site des Terres de Roumassouze (Gard) ont été présentés.

Les expériences ont été réalisées sur des parcelles agroforestières associant des noyers hybrides (*Juglans regia* x *Juglans nigra*) et une culture intercalaire de pomme de terre de la variété Charlotte. Trois niveaux d'ombrage ont été étudiés : C (témoin plein soleil, 0% d'ombrage) ; T (43% d'ombrage) ; L (62% d'ombrage). Sur ces parcelles, la croissance, le développement phénologique, la production brute et nette, ainsi que la qualité de la production ont fait l'objet de suivis réguliers. Ces mesures ont été mises en relation avec le microclimat (rayonnements photosynthétiquement actif - PAR ; température ; hygrométrie) de chaque parcelle.

Les résultats obtenus mettent en évidence un effet tampon sur la température et l'hygrométrie. Les plants de pommes de terre étaient plus grands et leur biomasse aérienne plus étalée sous 62% ombrage. Un retard de développement a été observé pour les modalités sous ombrage par rapport au témoin, notamment pour l'apparition des stades d'inflorescence et de sénescence. Des baisses de production ont été mises en évidence dans les modalités ombragées par rapport au plein soleil, néanmoins, les tubercules étaient proportionnellement de meilleure qualité commerciale sous ombrage. Enfin, les tubercules produits sous 62% d'ombrage présentaient des teneurs en matière sèche significativement plus élevées par rapport aux autres modalités. Ces résultats incitent à penser que la pomme de terre présente une capacité d'adaptation à l'ombrage par la mise en place de réponses écophysologiques pour compenser la réduction de la ressource lumineuse (étiolement). La réduction des radiations sous couvert agroforestier a impacté négativement la production, mais le retard de développement observé ainsi que les mécanismes de compensation aurait permis une production de meilleure qualité.

Cette étude renforce le potentiel de l'agroforesterie à répondre aux enjeux de réchauffement climatique en zone méditerranéenne et souligne certains phénomènes de facilitations assurant l'optimisation des ressources naturelles telles que la lumière et l'intensification de la production de la culture de pomme de terre sous noyers.