

Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome
Option production végétale durable

Évaluation des performances agronomiques de la culture de pomme de terre sous deux régimes d'irrigation en agroforesterie en climat méditerranéen



Par Lucile REGOUBY

Année de soutenance : 2025

Structure d'accueil : Pôle recherche et développement, Agroof

Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome
Option production végétale durable

Évaluation des performances agronomiques de la culture de pomme de terre sous deux régimes d'irrigation en agroforesterie en climat méditerranéen



Par Lucile REGOUBY

Année de soutenance : 2025

Mémoire préparé sous la direction de :
Romane METTAUER

Présenté le : 19/09/2025

Devant le jury :

Romane METTAUER (Tutrice)

Margot CHALLAND (Rapporteure)

Hélène MARROU (Présidente de jury)

Organisme d'accueil :

Pôle recherche et développement d'Agrooof

Encadrante de stage :

Camille BERAL

Résumé

Titre : Évaluation des performances agronomiques de la culture de pomme de terre sous deux régimes d'irrigation en agroforesterie en climat méditerranéen

Le maraîchage biologique diversifié dans le bassin méditerranéen français est soumis à de nombreux défis agronomiques, économiques et environnementaux auxquels s'ajoute le défi de l'adaptation de l'agriculture aux changements climatiques. L'agroforesterie, via ses services écosystémiques, apparaît comme un levier d'adaptation aux enjeux contemporains des maraîchers. Malgré la conception et le développement de systèmes agroforestiers, peu de références techniques et scientifiques existent quant au comportement des pommes de terre en agroforesterie en condition de stress hydrique.

L'objectif de cette étude est de caractériser les effets microclimatiques de la présence d'arbres matures ainsi que de deux régimes d'irrigation sur la croissance, le développement, le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau de la pomme de terre (cv. Désirée et Charlotte). L'étude s'est focalisée sur deux sites maraîchers expérimentaux à l'agencement agroforestier différent en zone méditerranéenne française en 2025.

Une réduction du rayonnement entre 43 % et 61 % a été relevée sous les arbres sur les deux sites. La température de l'air en agroforesterie est plus élevée de 1°C la nuit et inférieure jusqu'à 2,5°C en journée par rapport au témoin, ce qui témoigne de l'effet tampon exercé par les arbres sur le microclimat. Les pommes de terre se sont étiolées et ont eu un étalement de leur biomasse foliaire en réponse à l'ombrage. La production a été réduite jusqu'à 54 % en agroforesterie, et l'efficacité d'utilisation de l'eau a été multipliée par deux quand les pommes de terre ont été moins irriguées sous des arbres. De futures recherches sont nécessaires quant à l'effet d'un déficit hydrique en agroforesterie sur les performances agronomiques des pommes de terre.

Mots clés : *Solanum tuberosum*, microclimat, agroforesterie intraparcellaire, verger-maraîcher, rendement, efficacité d'utilisation de l'eau

Pour citer ce document : REGOUBY, Lucile, 2025. Évaluation des performances agronomiques de la culture de pomme de terre sous deux régimes d'irrigation en agroforesterie en climat méditerranéen. Mémoire d'ingénieur agronome, option Production Végétale Durable, L'Institut Agro Montpellier. 68 pages.

Abstract

Title: Effect of two irrigation levels in Mediterranean agroforestry on agronomic performance of potato.

Organic vegetable gardening in the French Mediterranean basin faces numerous agronomic, economic, and environmental challenges. Moreover, agriculture must adapt itself to climate change. Agroforestry, through its ecosystem services, adapts to the challenges faced by market gardeners. However, scientific references are scarce concerning the agronomic response of potatoes in mature agroforestry under water stress conditions.

The aim of this study is to characterise the microclimatic effects of mature trees and two irrigation regimes on the growth, development, yield, and water use efficiency of potatoes (cv. Désirée and Charlotte). The study focused on two experimental market gardens with different agroforestry systems in the French Mediterranean region in 2025.

A radiation reduction from 43% to 61% was observed under the trees in both market gardens. The air temperature in agroforestry is 1°C higher at night and up to 2.5°C lower during the day compared to the control, which demonstrates the buffering effect of trees on the microclimate. The potatoes were elongated and spread their leaf biomass in response to the shade. Production was reduced up to 54% in agroforestry treatment, and water use efficiency doubled when potatoes were less irrigated under trees. Further research is needed on the effect of water deficit in agroforestry on the ecophysiological response of potatoes.

Key words : *Solanum tuberosum*, microclimate, alley cropping, yield, water use efficiency

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu ma maître de stage, Camille Béral, pour son soutien au cours de ce stage. Son expertise, et sa rigueur scientifique m'ont été d'une grande aide dans la prise de recul au cours du stage et à la réalisation de ce mémoire. Merci Camille pour ta disponibilité et ton humour sur le terrain.

Mes remerciements vont également à Lison Josso qui m'a aidé à collecter des données pendant les heures les plus chaudes de l'année sur les pommes de terre mais pas que ... Merci Lison de ta patience pendant ces longues journées de terrain.

Je tiens à remercier Romane Mettauier pour son apport scientifique, son soutien et ses réflexions pertinentes. Merci Romane, ce document n'aurait pas la même qualité sans tous tes commentaires précis.

Je tiens particulièrement à remercier Nicolas Verzotti qui m'a accueilli sur la Ferme du Colibri. Merci Nicolas pour ta générosité, les bonnes frites, et les discussions très enrichissantes.

Je remercie également toute l'équipe agroofienne de m'avoir si bien accueillie pendant ces 6 mois. Un immense merci à toutes celles et ceux qui m'ont aidé sur le terrain. Merci Valentin pour ton humour absurde et tes questions profondes sorties de nulle part. Merci Hélène pour ta disponibilité et tes recommandations culturelles. Merci Fabien pour ton second degré qui m'a valu de bonnes rigolades. Merci Daria de m'avoir fait découvrir des super jeux de société. Puis merci encore à toute l'équipe de m'avoir partagé vos projets entre la plantation d'arbres et les projets d'installation de la pépinière.

J'aimerais pour finir remercier mes proches, notamment mes ami·es pour leur soutien émotionnel et ma famille qui m'a soutenu pendant toutes mes années d'études.

Avant-propos

Je soussignée REGOUBY Lucile :

- déclare avoir respecté les consignes de non-plagiat.
- déclare avoir utilisé l'IA générative ChatGPT (modèle 4-turbo d'OpenAI) afin d'aider à la construction et la vérification des scripts statistiques sous le logiciel libre d'accès R. J'ai revu et validé tous les éléments générés et en assume l'entière responsabilité.
- déclare avoir utilisé QuillBot pour la correction de fautes d'orthographe et de grammaire.

Table des matières

Résumé.....	3
Abstract.....	4
Remerciements.....	5
Avant-propos.....	5
Sigles et abréviations.....	8
1 Introduction.....	14
2 Contexte et état de l'art.....	16
2.1 Le maraîchage biologique en climat méditerranéen.....	16
2.1.1 Le maraîchage dans la zone méditerranéenne française et ses enjeux.....	16
2.1.2 Caractérisation du changement climatique en zone méditerranéenne.....	17
2.2 L'agroforesterie en maraîchage, un moyen de limiter les risques liés au changement climatique.....	18
2.2.1 Des systèmes traditionnels presque disparus à un retour du maraîchage agroforestier.....	18
2.2.2 Interactions complexes entre arbres et légumes.....	18
2.2.2.1 Effet des arbres sur les flux de matière organique, hydriques et sur la biodiversité.....	19
2.2.2.2 Modifications microclimatiques aérienne induite par les arbres.....	19
2.3 Caractéristiques de la pomme de terre.....	21
2.3.1 Réponse des pommes de terre aux risques liés au changement climatique.....	22
2.3.2 Impact de l'agroforesterie sur la production de pomme de terre.....	23
3 Problématique, hypothèses et démarche.....	25
4 Matériel et méthodes.....	26
4.1 Les Terres de Roumassouze.....	26
4.1.1 Caractéristique générale du site et matériel biologique.....	26
4.1.2 Dispositif expérimental.....	27
4.2 Ferme du Colibri.....	29
4.2.1 Caractéristique générale du site et matériel biologique.....	29
4.2.2 Dispositif expérimental.....	29
4.3 Variables d'études sur les deux sites expérimentaux.....	31
4.3.1 Caractérisation du microclimat et du paysage.....	31
4.3.2 Croissance et développement des pommes de terre.....	32
4.3.3 Rendement et valeur commerciale.....	32
4.4 Méthode de traitement statistique	33
5 Résultats.....	34
5.1 Les terres de Roumassouze.....	34
5.1.1 Caractérisation du microclimat.....	34
5.1.1.1 Rayonnement et ouverture de canopée.....	34
5.1.1.2 Température et humidité relative.....	35
5.1.1.3 Tension hydrique dans le sol.....	36
5.1.2 Performances agronomiques.....	37
5.1.2.1 Croissance.....	37
5.1.2.2 Développement.....	38
5.1.2.3 Rendement.....	39
5.2 La ferme du Colibri.....	41
5.2.1 Caractérisation du microclimat.....	41
5.2.1.1 Rayonnement photosynthétiquement actif.....	41
5.2.1.2 Température et humidité relative.....	41
5.2.2 Croissance, développement et performances agronomiques.....	42

5.2.2.1 Croissance et développement.....	42
5.2.2.2 Rendement.....	44
6 Discussion.....	46
6.1 Effet des arbres sur le microclimat.....	46
6.1.1 Rayonnement.....	46
6.1.2 Température et hygrométrie.....	46
6.1.3 Tension hydrique dans le sol.....	47
6.2 Performances agronomiques.....	47
6.2.1 Croissance et développement en pleine irrigation.....	47
6.2.2 Rendement sous deux régimes d'irrigation.....	49
6.3 Discussion des méthodes employés.....	50
6.4 Perspectives.....	52
7 Conclusion.....	53
Bibliographie.....	54
Annexe.....	65

Sigles et abréviations

AB : Agriculture Biologique

AF : Agroforesterie

ALMANAC : Accompany Le Maraîchage Agroforestier par une Approche Collaborative

ANOVA : Analyse de la variance.

ASP : Agence de Service et de Paiement

DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt

ETP : Evapotranspiration Potentielle

FAO : Food and Agricultural Organisation – Organisation pour l'alimentation et l'agriculture

GIEC : Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

INRA / INRAE : Institut National de Recherche Agronomique / Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

ITK : Itinéraire technique

L – T – C : Élagué – Têtard – Control (Plein Soleil)

LMA : Leaf Mass per Area, masse surfacique des feuilles

MedECC : Mediterranean Expert on Climate and environmental Change – Réseau méditerranéen d'experts sur les changements climatiques et environnementaux

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index – Indice de végétation par différence normalisée

PACA : Provence Alpes Côtes d'Azur

PAR : Photosynthetically Active Radiation – Rayonnement photosynthétiquement actif

PSH : Plante et systèmes de culture horticoles

SAU : Surface Agricole Utile

SCOP : Société Coopérative et Participative

SE : Standard Error – Erreur standard

UMR : Unité mixte de recherche

WUE : Water Use Efficiency – Efficience d'utilisation de l'eau

Table des figures

Figure 1: Effets de l'agroforesterie en allée intraparcellaire sur le microclimat. Les cases vertes représentent les propriétés des systèmes agroforestiers qui influencent les paramètres du microclimat. Leurs effets ainsi que les interactions entre les paramètres du microclimat sont indiqués par des flèches noires. La couleur de la case correspondant au paramètre microclimatique indique une augmentation (rouge) ou une réduction (bleu) par rapport à un système de culture unique. Source : Jacobs et al., 2022.....	20
Figure 2: Stades de développement de la pomme de terre de la germination à la sénescence.....	22
Figure 3: Terres de Roumassouze - Photographie aérienne globale des dispositifs expérimentaux du site (Google Earth).....	27
Figure 4: Terres de Roumassouze - Photographie aérienne des modalités agroforestières. La punaise blanche représente la position des deux buttes de pommes de terre. (Source : Géoportail, juillet 2024).....	28
Figure 5: Terres de Roumassouze - Dispositif expérimental pour les suivis agronomiques et microclimatiques.....	29
Figure 6: Ferme du Colibri - Photographie aérienne de l'exploitation et des parcelles de pommes de terre étudiées. Flèches vertes : alignements de figuiers et pommiers. Flèches oranges : alignement de figuiers et de poiriers. Flèche bleue : haie pluri-spécifique composé principalement de noisetiers et de pruniers myrobolans (Source : géoportail, 06-2024).....	30
Figure 7: Ferme du Colibri - Dispositif expérimental pour les suivis agronomiques et microclimatiques (pas à l'échelle).....	31
Figure 8: Terres de Roumassouze : A - Rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) moyen par heure (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2$) pour mai (05), juin (06) et juillet (07).....	35
Figure 9: Terres de Roumassouze : A - Ecart des températures moyennes horaire ($^{\circ}\text{C}$) au Control en fonction des heures de la journée. B - Ecart de l'humidité relative moyenne horaire (%) au Control. Le Têtard (T) est en vert et l'Élaguée (L) est en bleu. Barre d'erreur = erreur standard. La ligne en pointillé rouge $y=0$ représente la modalité Control.....	36
Figure 10: Terres de Roumassouze : Évolution de la tension hydrique du sol pour les modalités agroforestières et d'irrigation au cours de la saison de culture. Le Control (C) est en rouge, le Têtard (T) en vert et Élaguée (L) en bleu. La demi-irrigation (0.5) est représentée en pointillé et la pleine irrigation (1) est représentée en trait plein.....	37
Figure 11: Terres de Roumassouze : A – Évolution de la hauteur des pommes de terre pour les différentes modalités agroforestières en pleine irrigation. B – Évolution de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) moyen (%) en pleine irrigation pendant la saison de culture. Le Control (C) est en rouge, le Têtard (T) en vert et l'Élaguée (L) en bleu. Barre d'erreur = erreur standard.....	38
Figure 12: Terres de Roumassouze : A – Masse surfacique moyenne des feuilles (LMA) (g/cm^2) en pleine irrigation en fonction de la modalité agroforestière. ANOVA, $\text{LMA} \sim \text{AF}$, $p\text{-value} = 2,11 \text{ e-}6$, $\alpha = 5 \%$. Test post-hoc Tukey. Les lettres différentes représentent une différence significative de LMA entre les modalités. Barre d'erreur = erreur standard. B – Masse surfacique moyenne des feuilles (LMA) (g/cm^2) en fonction de l'ouverture de canopée (%) et de la modalité agroforestière. Régression linéaire, $\text{LMA} \sim \text{Ouverture canopée}$, $p\text{-value} = 4,61 \text{ e-}5$, $\alpha = 5 \%$. Le Control (C) est en rouge, le Têtard (T) en vert et l'Élaguée (L) en bleu.....	39

- Figure 13: Terres de Roumassouze : Évolution des stades de développement des pommes de terre au cours de la saison de culture en pleine irrigation pour les modalités agroforestières (AF). Le Control (C) est en rouge, le Têtard (T) est en vert et l'Élaquée (L) est en bleu. Barre d'erreur = erreur standard.....39
- Figure 14: Terres de Roumassouze : A – Production commercialisable en pleine irrigation (g/plant) par modalité agroforestière (AF). B – Production commercialisable en demi-irrigation (g/plant) par modalité agroforestière (AF). Kruskal-Wallis, rendement commercialisable ~ AF, $\alpha = 5\%$, test post-hoc Dunn. C – Efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) (g/L/plante). Kruskal-Wallis, WUE ~ AF * Irrigation, $\alpha = 5\%$, Test post-hoc Dunn. Le Control (C) est en rouge, le Têtard (T) est en vert et l'Élaquée (L) est en bleu. Barre d'erreur = erreur standard. D - Proportion du nombre de tubercules dans les classes de calibre (%) pour les modalités agroforestières et d'irrigation. Les tubercules de moins de 35 mm de calibre sont en rouge, ceux compris entre 35 et 45 mm sont en vert, ceux compris entre 45 et 55 mm sont en bleu et les tubercules de plus de 55 mm de calibre sont en violet. La demi-irrigation est représentée par 0.5 et la pleine irrigation est représentée par 1.....41
- Figure 15: Ferme du Colibri : A – Rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) moyen par heure ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$). Kruskal-Wallis, PAR ~ Distance, p-value < 2.2 e-16, $\alpha = 5\%$. B – Écart de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) moyen (%) par heure par rapport au témoin. Le rang 1 (R1) est en rouge, le rang 4 (R4) en vert et le témoin en violet. La ligne en pointillé y=0 violette symbolise le témoin. Barre d'erreur = erreur standard.....42
- Figure 16: Ferme du Colibri : A – Ecart des températures moyennes horaire ($^{\circ}\text{C}$) au témoin en juillet 2025. B – Ecart d'humidité relative moyenne horaire (%) au témoin en juillet 2025. Le rang 1 est en rouge, le rang 4 est en vert et le témoin est représenté par la ligne en y = 0 en pointillé violet. Barre d'erreur = erreur standard.....43
- Figure 17: Ferme du Colibri : A – Hauteur d'un plant de pomme de terre (cm) le 17 juin 2025 en pleine irrigation en fonction de la distance à la haie. ANOVA, Hauteur ~ Distance, p-value < 1,19 e-7, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Tukey. B – Indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (%) le 17 juin 2025 en pleine irrigation en fonction de la distances à la haie. Kruskal-Wallis, Hauteur ~ Distance, p-value = 0,00472, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Dunn. Le rang 1 (R1) est en rouge, le rang (R2) en jaune, le rang 4 (R4) en vert, le rang 5 (R5) en bleu et le témoin (T) en violet. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les rangs. Barre d'erreur = erreur standard.....44
- Figure 18: Ferme du Colibri : A – Masse surfacique des feuilles (LMA) (g/cm^2) en pleine irrigation en fonction de la distance à la haie. ANOVA, LMA~Distance, p-value = 0,000438, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Tukey. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités. Barre d'erreur = erreur standard. B – Masse surfacique des feuilles (LMA) (g/cm^2) en fonction de l'ouverture de canopée (%) et du type d'irrigation. Régression linéaire, LMA~Ouverture canopée. p-value = 1,32 e-6, $\alpha = 5\%$. Les triangles symbolisent la demi-irrigation, et les ronds la pleine irrigation. Le rang 1 (R1) est en rouge, le rang (R2) en jaune, le rang 4 (R4) en vert, le rang 5 (R5) en bleu et le témoin (T) en violet.....45
- Figure 19: Ferme du Colibri : Stade phénologique des pommes de terre le 20 mai 2025 en pleine irrigation en fonction de la distance à la haie. Kruskal-Wallis, Phenologie ~ Distance, p-value = 0,0317, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Dunn. Les lettres différentes représentent une différence significative de stade de développement. Barre d'erreur = erreur standard.....45
- Figure 20: Ferme du Colibri : A – Production commercialisable (g/plant) en pleine irrigation en fonction de la distance à la haie. B – Production commercialisable (g/plant) en demi-irrigation en fonction de la distance à la haie. ANOVA, Rendement commercialisable ~ Distance, $\alpha =$

5%. Test post-hoc de Tukey. C – Efficience d'utilisation de l'eau (g/L/plant) pour les distances à la haie et le type d'irrigation. Kruskal-Wallis, $WUE \sim \text{Distance} * \text{Irrigation}$, p-value < 2,2 e-16, $\alpha = 5\%$. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités. Barre d'erreur = erreur standard. Le rang 1 (R1) est en rouge, le rang (R2) en jaune, le rang 4 (R4) en vert, le rang 5 (R5) en bleu et le témoin (T) en violet. D – Proportion du nombre de tubercules dans les 4 classes de calibre en fonction de la distance à la haie et du type d'irrigation. Les tubercules de moins de 35 mm de calibre sont en rouge, ceux compris entre 35 et 45 mm sont en vert, ceux compris entre 45 et 55 mm sont en bleu et les tubercules de plus de 55 mm de calibre sont en violet. La demi-irrigation est représentée par 0.5 et la pleine irrigation est représentée par 1.....47

Table des tableaux

Tableau 1: Synthèse des réponses écophysologiques de la pomme de terre à l'ombrage.....	24
Tableau 2: Terres de Roumassouze : Quantité d'eau apportée par butte (L) pour chaque modalité agroforestière.....	28
Tableau 3: Ferme du Colibri : Quantité d'eau apportée (en L) par rang par mètre linéaire de pomme de terre.....	31
Tableau 4: Dispositifs expérimentaux mis en place pour les suivis agronomiques.....	32
Tableau 5: Récapitulatif des dates de début de collecte par site expérimental et par mesure microclimatique.....	33
Tableau 6: Classe de dégât et code correspondant.....	33
Tableau 7: Échelle de calibrage.....	33
Tableau 8: Terres de Roumassouze : Récapitulatif de l'ouverture de canopée $\pm$ erreur standard (%) et cumul des rayonnements photosynthétiquement actifs (PAR) moyen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) en fonction des modalités agroforestières. ANOVA, <i>Ouverture de canopée</i> $\sim$ AF, <i>p-value</i> = 2,2 e-16, α = 5 %. <i>Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités.</i>	35
Tableau 9: Terres de Roumassouze : Températures moyennes ($^{\circ}\text{C}$), amplitudes de température moyenne ($^{\circ}\text{C}$) et humidité relative moyenne (%) $\pm$ erreur standard pour les modalités agroforestières. Pour l'amplitude de température, Kruskal-Wallis, <i>Amplitude</i> $\sim$ AF, <i>p-value</i> = 1,0 e-3, α = 5 %. <i>Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités.</i>	36
Tableau 10: Terres de Roumassouze : Tensions hydriques moyennes du sol $\pm$ erreur standard (kPa) et l'estimation de la quantité totale d'eau apportée sur toute la saison de culture (en L) pour les modalités agroforestières et d'irrigation. Kruskal-Wallis, <i>moyenne tensiomètre</i> $\sim$ AF * irrigation, <i>p-value</i> < 2.2 e-16, α = 5 %. <i>Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités.</i>	37
Tableau 11: Terres de Roumassouze : Hauteur moyenne (cm) le 11 juin 2025 et indice de végétation par différence normalisée (NDVI) moyen $\pm$ erreur standard pour la pleine irrigation. Les p-values des tests de Kruskal-Wallis et ANOVA (variable à expliquer $\sim$ AF, α =5 %) sont présentés. <i>Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités.</i> ..	38
Tableau 12: Terres de Roumassouze : Nombre de plants ayant des dégâts provoquant la non-commercialisation de certains tubercules pour les modalités agroforestières (AF) et d'irrigation (Irri). Les principaux dégâts sont : petit pour un diamètre inférieur à 35 mm, morsure par un rat taupier, tubercule présentant des trous et tubercules verts.....	40
Tableau 13: Terres de Roumassouze : Récapitulatif des moyennes et des erreurs standard de la production brute et nette (g/plant), du nombre de tubercules brut et net par plant et du poids spécifique des tubercules commercialisables pour les modalités agroforestières (AF) et d'irrigation (Irri). Des tests de Kruskal-Wallis ont été effectués sous la forme : variable à expliquer $\sim$ AF * Irrigation, les p-values sont précisées dans le tableau. Les lettres différentes (issues des tests de Dunn) représentent une différence significative entre les modalités.....	41
Tableau 14: Ferme du Colibri : Cumul des rayonnements photosynthétiquement actifs (PAR) moyen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) en fonction des distances à la haie.....	42
Tableau 15: Ferme du Colibri : Récapitulatif des températures moyennes ($^{\circ}\text{C}$), des amplitudes de température moyenne ($^{\circ}\text{C}$) et d'humidité relative moyenne (%) $\pm$ erreur standard pour les	

distances à la haie en juillet 2025. Les p-values des tests de Kruskal-Wallis et ANOVA (variable à expliquer ~ Distance, $\alpha = 5\%$) sont présentées. Les lettres différentes des tests de Dunn et de Tukey représentent une différence significative entre les modalités.....43

Tableau 16: Ferme du Colibri : Récapitulatif des moyennes et des erreurs standard de la production brute et nette (g/plant), du nombre de tubercules bruts et nets par plant et du poids spécifique des tubercules commercialisables pour les différentes distances à la haie et le type d'irrigation. Les tests, les p-values ainsi que les modèles linéaires retenus sont précisés. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités.....46

Annexes

Annexe 1 : Schéma de l'effet de la photopériode et de la température sur la tubérisation des pommes de terre.....67

Annexe 2 : Tableau de synthèse des itinéraires techniques pour la conduite des pommes de terre sur les 2 sites expérimentaux.....67

Annexe 3 : Stades phénologiques sélectionnés pour le suivi du développement de la pomme de terre. Source : échelle BBCH des stades phénologiques de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) Hack et al. 1993.....68

1 Introduction

Le maraîchage biologique diversifié dans le bassin méditerranéen est soumis à de nombreux enjeux tels que la pression foncière, la gestion de la charge de travail et de la main d'œuvre ainsi que la structuration de la filière (ASP, 2016). D'un point de vue agronomique, la gestion des adventices ainsi que des ravageurs font partie des enjeux principaux auxquels s'ajoute le maintien de la fertilité des sols et de la biodiversité (Vennetzel, 2011). De plus, la production de légumes doit faire face aux conséquences du changement climatique, déjà observables dans le bassin méditerranéen avec entre autres une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses et une modification de la répartition des précipitations (Calvin et al., 2023; Soubeyroux et al., 2024). Les politiques publiques rentrent également en jeu via des restrictions d'utilisation d'eau alors qu'il est nécessaire d'irriguer en période estivale pour assurer une récolte (Chambre d'agriculture PACA, 2009). Ainsi, l'adaptation des systèmes maraîchers au changement climatique apparaît comme nécessaire. L'adaptation est possible via la conception de nouveaux systèmes de production écologiquement intensifs, diversifiés, économes en intrants et productifs. L'agroforesterie, c'est-à-dire l'introduction d'arbres dans les systèmes de culture, est un levier potentiel dont les services écosystémiques pourraient permettre de répondre aux enjeux climatiques, agricoles et environnementaux actuels (Jacobs et al., 2022).

Toutefois, peu de références existent quant aux comportements et aux performances des cultures maraîchères en agroforesterie en zone méditerranéenne. Ces références sont de plus en plus nécessaires par rapport au nombre grandissant de maraîcher·ère·s s'intéressant à la conception et à la gestion de systèmes agroforestiers.

Agroof est une Société Coopérative et Participative (SCOP) spécialisée dans l'étude et le développement des systèmes agroforestiers en France depuis l'an 2000. Agroof coordonne et réalise des projets de recherche et de développement sur les systèmes maraîchers agroforestiers depuis 2014 en partenariat avec des organismes de recherche, des organismes techniques et des agriculteur·ice·s. Les premières expérimentations menées par Agroof dans le cadre du projet Abratatouille 1 et 2 (2014 – 2019) se sont portées sur l'étude des performances agronomiques des tomates, salades et oignons dans un microclimat agroforestier. Le projet ALMANAC 2 (2023 – 2025) a initié les expérimentations sur la pomme de terre agroforestière dans plusieurs fermes dans le Gard et le Vaucluse via l'encadrement de deux stages de fin d'études (Broyer, 2023; Verstraete, 2024).

Le projet Abratatouille 3 (2024 – 2027) est financé par l'Agence de l'eau et la région Occitanie. Il est réalisé par Agroof, les unités mixtes de recherche (UMR) Eco&Sol et Plante et Systèmes de culture Horticole (PSH) de l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement (INRAE) et le maraîcher Nicolas Verzotti. Ce projet vise à améliorer les connaissances sur les interactions entre arbres et productions maraîchères afin de proposer des pistes de réflexion pour la conception et la gestion de systèmes agroforestiers maraîchers. Il s'inscrit dans la continuité des projets de recherche précédents sur les cultures maraîchères agroforestières et permet d'initier les recherches sur les courgettes et les poivrons tout en continuant les recherches sur la tomate et la pomme de terre agroforestières sur deux sites pilotes : la Ferme du Colibri (Vaucluse) et les Terres de Roumassouze (Gard). La présente étude développe les expérimentations

et les résultats autour de la pomme de terre. Elle a pour ambition **d’appréhender les changements de microclimat induits par la présence et la conduite d’arbres sur le comportement et les performances agronomiques des pommes de terre en système maraîcher biologique agroforestier méditerranéen sous plusieurs régimes d’irrigations différents.**

Dans un premier temps, une synthèse bibliographique rend compte des enjeux actuels de l’agroforesterie maraîchère biologique dans le bassin méditerranéen français notamment et plus particulièrement la production de la pomme de terre. Dans un second temps, la démarche retenue, la présentation des expérimentations et les méthodologies sont explicitées. Les résultats des expérimentations sont présentés et analysés dans une troisième partie avant d’être discutés dans une dernière partie.

2 Contexte et état de l’art

2.1 Le maraîchage biologique en climat méditerranéen

2.1.1 Le maraîchage dans la zone méditerranéenne française et ses enjeux

La production maraîchère est la troisième production d’importance de la zone méditerranéenne française, qui s’étend des Pyrénées-Orientales aux Alpes-Maritimes. 15 % de la surface agricole utile (SAU) y sont dédiés à la production légumière à côté des productions viticole (34 %) et fruitière (16 %) (DRAAF PACA, 2024). Ainsi, les régions de la zone méditerranéenne française que sont l’Occitanie et la Provence-Alpes-Côte d’Azur (PACA) sont des régions à forte production maraîchère au niveau national. À titre d’exemple, l’Occitanie est la quatrième région productrice de légumes frais avec 8 % des surfaces françaises (Chambre d’agriculture d’Occitanie, 2023). Enfin, notons que la production maraîchère en Agriculture Biologique (AB) est fortement développée avec plus d’un tiers des surfaces en AB (DRAAF PACA, 2024).

Bien que développé, le maraîchage biologique fait face à de nombreux enjeux dans la zone méditerranéenne française. Tout d’abord, la pression foncière pour le maraîchage, comme pour les autres filières agricoles, y est élevée (ASP, 2016). En effet, le territoire méditerranéen est soumis à une augmentation de l’urbanisation et de la littoralisation provoquée par une forte croissance démographique à laquelle s’ajoute le tourisme (Hervieu & Abis, 2006).

Deuxièmement, l’accès à l’eau est un enjeu majeur pour le maraîchage dans le territoire méditerranéen. En effet la production maraîchère est gourmande en eau. À ce titre, la moitié des surfaces irrigables françaises en 2020 sont des surfaces maraîchères ou horticolas (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2024). Ainsi, face à une concurrence internationale, l’accès à la ressource en eau est un enjeu fort pour la compétitivité des exploitations maraîchères méditerranéennes (Chambre d’agriculture PACA, 2009).

Ensuite, le maraîchage biologique fait face à un enjeu de commercialisation car la diminution des consommations de produits biologiques est particulièrement forte sur les fruits et légumes (Couet, 2023). La production maraîchère doit également pouvoir s’adapter aux besoins et aux envies des consommateurs tout en étant en concurrence avec des légumes biologiques de provenance européenne et/ou mondiale qui affichent des prix attractifs pour le consommateur (Bio PACA, 2015).

Enfin, le maraîchage biologique dans la zone méditerranéenne doit nécessairement s’adapter à un climat contraignant et en évolution. Le climat méditerranéen est caractérisé par des hivers doux et humides aux températures rarement inférieures à 5 °C et des étés chauds et secs pouvant atteindre les 40 °C (del Pozo et al., 2019; Hufty, 2001). Ce climat est notamment marqué par des épisodes pluvieux extrêmes et soudains en automne, nommés épisodes cévenols ou méditerranéens lorsqu’ils atteignent plus de 100 mm de pluie en une journée (Jacques, 2016) et qui peuvent provoquer des inondations et des crues. Les rendements de légumes de plein champ de fin d’été et d’automne sont grandement impactés par ces épisodes météorologiques (Agreste, 2024). À l’inverse, des sécheresses en périodes estivales sont de plus en plus communes dans cette région en lien avec une

hausse des températures provoquées par le changement climatique (MedECC, 2020), ce qui empêche la production de légumes s'ils ne sont pas irrigués. Ainsi, ce stage traite de l'enjeu de production de légumes biologiques dans un contexte de changement climatique.

2.1.2 Caractérisation du changement climatique en zone méditerranéenne

Le MedECC (Mediterranean Experts on Climate and environmental Change) affirme qu'à l'échelle du bassin méditerranéen, les températures moyennes annuelles sont aujourd'hui 1,54 °C au-dessus du niveau de 1860-1890 pour les zones terrestres et marines, c'est-à-dire 0,4 °C supérieures au changement moyen mondial (MedECC, 2020). Le MedECC déclare avec une confiance élevée qu'avec 4 °C de réchauffement climatique, pratiquement toutes les nuits seront tropicales (température nocturne supérieure pendant au moins cinq jours à 20 °C) et il n'y aura presque aucun jour froid (inférieur à un seuil dépendant du lieu) (MedECC, 2020). Météo France annonce que, selon un niveau de réchauffement de +4 °C d'ici 2100, la température moyenne annuelle pourrait atteindre +18 °C sur la moitié sud de la France comparée à l'aire préindustrielle ce qui se rapprocherait du climat actuel en Andalousie (Soubeyroux et al., 2024). Ils notent également que le réchauffement est plus marqué en été qu'en hiver, de l'ordre de 1 °C (Soubeyroux et al., 2024).

Concernant les précipitations, les projections climatiques futures indiquent un changement prédominant vers un régime de précipitations présentant une plus grande variabilité inter-annuelles, une intensité plus forte et des extrêmes plus importants (en particulier en hiver, au printemps et en automne) alors que la quantité de précipitations annuelles resterait inchangée (Chaouche et al., 2010; MedECC, 2020; Soubeyroux et al., 2024). À l'échelle de la France, pour un niveau de réchauffement à +4 °C en 2100, la valeur moyenne du changement de précipitation en été est de l'ordre de -20 %, et en hiver de +15 % (Soubeyroux et al., 2024). Ainsi, la disparité des précipitations entre hiver et été risque d'être accrue.

Ces modifications du climat ont déjà des conséquences importantes pour les productions agricoles. Ainsi, le stress provoqué par de hautes températures (supérieures à 30 °C) inhibe le fonctionnement de la photosynthèse, la croissance de la plante, et par conséquent son rendement (Mathur et al., 2014). Le MedECC affirme avec une confiance élevée que des conditions climatiques plus chaudes et sèches, avec des événements extrêmes plus fréquents et intenses, combinées à la dégradation des sols et à l'émergence de nouveaux pathogènes, peuvent provoquer des pertes de rendement et réduire la qualité des récoltes (MedECC, 2020).

Parmi plusieurs possibilités, passer à un système de production agroforestier permettrait une adaptation au changement climatique (Grigorieva et al., 2023; Ministère de la transition écologique, 2019). L'agroforesterie correspond à l'association d'arbres et de cultures et/ou d'animaux sur une même surface (Dupraz & Liagre, 2019). L'agroforesterie maraîchère peut donc être définie comme l'association de légumes proches d'arbres fruitiers ou forestiers.

2.2 L'agroforesterie en maraîchage, un moyen de limiter les risques liés au changement climatique

2.2.1 Des systèmes traditionnels presque disparus à un retour du maraîchage agroforestier

Les systèmes maraîchers agroforestiers ont déjà existé traditionnellement sur le pourtour méditerranéen. La *huerta* ou *coltura promiscua* est une forme d'agroforesterie traditionnelle localisée où chaque parcelle accueille des arbres associés à des cultures céréalières, de la vigne et/ou des légumes. Ces systèmes intensifs étaient utilisés dans les régions où la terre cultivable est rare pour une agriculture essentiellement vivrière (Dupraz & Liagre, 2019). À la fin du XVII^e siècle, le principe même de l'association de différentes cultures dans un même champ a été remis en question par les agronomes de l'époque, soulignant leurs besoins différents et donc leur incompatibilité mutuelle (Ferrario, 2021). En conséquence, entre le XIX^e et le XX^e siècle, la spécialisation des territoires, l'intensification, la mécanisation, l'utilisation d'engrais et de pesticides de synthèse, et la réduction drastique des emplois agricoles ont touché les différentes régions du pourtour européen de la Méditerranée (Ferrario, 2021). Parallèlement, les politiques publiques de la seconde moitié du XX^e siècle ont incité à l'agrandissement des parcelles et à la mécanisation pour subvenir aux besoins alimentaires de l'Europe. De fait, l'arbre a été chassé des parcelles et le remembrement a fait disparaître un grand nombre de haies. Jusqu'à récemment, la perte d'alignements d'arbres est estimée à 23 500 km par an sur la période 2017 – 2021 (Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2023). Ainsi, c'est au profit d'une agriculture mécanisée que les systèmes maraîchers agroforestiers traditionnels ont disparu.

Aujourd'hui, face à l'enjeu d'adaptation au changement climatique, ainsi qu'aux enjeux de la filière maraîchère, l'agroforesterie apparaît susceptible de fournir des services écosystémiques et une diversification des productions et connaît donc un regain d'intérêt. Ainsi, des maraîchers tendent à associer de nouveau leurs cultures avec des arbres (fruitiers, forestiers, haies) pour, entre autres, optimiser l'espace de production et la source de revenus sur une même surface (Warlop et al., 2017). La recherche sur les interactions entre les cultures et les arbres est complexe et relativement récente, il est donc nécessaire de poursuivre ces recherches pour mieux comprendre les déterminants des performances des systèmes agroforestiers et ainsi faciliter l'accompagnement à la conception et à la gestion de ces systèmes dans un contexte de changement climatique (Léger et al., 2019; Warlop, 2018).

2.2.2 Interactions complexes entre arbres et légumes

Introduire des arbres dans des parcelles maraîchères induit des modifications de l'environnement et des interactions, notamment concernant la lumière, l'eau, les nutriments, et mettant également en jeu des interactions biotiques. Ces interactions peuvent être perçues comme des facilitations (augmentation de la ressource à partager), comme des compétitions (partage d'une ressource donnée) ou comme neutres pour la production des légumes en fonction, entre autres, du choix des essences d'arbres, de leur conduite, de la distance aux arbres, des cultures et des variétés associées, des itinéraires techniques mis en œuvre, du sol, etc. (Dupraz & Liagre, 2019; Jose et al., 2004; Smith, 2010).

2.2.2.1 *Effet des arbres sur les flux de matière organique, hydriques et sur la biodiversité*

Les arbres sont des plantes pérennes, ils ont la capacité de faire des racines profondes si le sol et le sous-sol le permettent. La présence de racines pérennes et profondes peut faciliter l'infiltration de l'eau dans les couches profondes du sol, et en même temps limiter les fuites d'azote par lixiviation (Tsonkova et al., 2012). Des modifications de la structure du sol sont également induites par les racines des arbres et de la bande enherbée (Ramananjatovo et al., 2021). Ceci combiné à la couverture du sol à la fois vivante et morte sur les allées d'arbres contribue notamment à limiter les risques d'érosion des sols (Tsonkova et al., 2012).

Par ailleurs, l'agroforesterie, via la production de biomasses aérienne (feuille tombée au sol) et souterraine (turn-over racinaire) des arbres, ainsi que celle d'une bande enherbée au pied des arbres, permet de modifier les flux de matière organique sous les arbres (Bhardwaj et al., 2017; Quandt et al., 2023). Les haies ont révélé les taux de séquestration du carbone organique du sol les plus élevés dans les couches arable (0-20cm) et (20-40cm) (respectivement $0,32 \pm 0,26$ et $0,28 \pm 0,15 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$), suivies par les systèmes agroforestiers intraparcellaires ($0,26 \pm 1,15$ et $0,23 \pm 0,25 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) (Mayer et al., 2022). Comparée à une agriculture conventionnelle, l'agroforesterie a de plus faibles sorties de nutriments, car moins de récolte et plus de transferts de nutriments à l'intérieur du système (Tsonkova et al., 2012) par le biais du recyclage de la biomasse aérienne et racinaire (Mayer et al., 2022).

L'amélioration des teneurs en matière organique en sol agroforestier et les modifications de structure du sol peuvent améliorer la vie de la faune du sol (Marsden et al., 2020; Mayer et al., 2022). De plus, il a été démontré que les arbres ainsi que des bandes enherbées pérennes sous les alignements d'arbres apportent une hétérogénéité dans le paysage qui permet d'accueillir plus de biodiversité, de flore et de faune comparée à une agriculture conventionnelle (Bhardwaj et al., 2017; Marsden et al., 2020; Tsonkova et al., 2012).

Enfin, les interactions souterraines entre arbres et légumes peuvent être compétitrices ou facilitatrices concernant l'eau et les éléments minéraux, dépendamment du contexte pédoclimatique et de la gestion des arbres et des légumes. Par exemple, une facilitation de l'utilisation de l'eau du système est possible si les racines des arbres arrivent à récupérer l'eau qui n'a pas été retenue par les légumes (Dupraz & Liagre, 2019). À l'inverse, une compétition pour l'eau peut apparaître en condition de sécheresse dans un système non irrigué où les racines des arbres cohabitent à la même profondeur que celle des légumes (Jose et al., 2004). Il faut noter que si les ressources souterraines sont limitantes, il est probable d'avoir des compétitions entre légumes et arbres (Dupraz & Liagre, 2019).

2.2.2.2 *Modifications microclimatiques aériennes induites par les arbres*

Le microclimat peut être défini comme « l'ensemble des conditions climatiques d'un espace homogène très restreint et isolé de son environnement général » (Larousse, 2025). Plusieurs paramètres le définissent tels que le rayonnement, la température et l'hygrométrie qui sont des facteurs primordiaux à la production végétale. Le microclimat peut également être influencé par la

pluviométrie, la force et la direction du vent, car ils vont agir sur la température et l'hydrométrie (Jacobs et al., 2022).

Les arbres sont susceptibles de modifier le microclimat des parcelles via une modification des flux radiatifs, hydriques et turbulents et par conséquent d'impacter les performances agronomiques des cultures sous les arbres (Lasco et al., 2014; Quandt et al., 2023; Ramananjatovo et al., 2021). L'ensemble des impacts de la présence des arbres sur le microclimat d'une parcelle sont repris en Figure 1. Les modifications microclimatiques sont fortement dépendantes des agencements spatiaux sur la parcelle, comme l'orientation des arbres et leur hauteur, mais aussi de l'environnement de la parcelle, comme la topographie ou le relief (Dufour et al., 2020; Jacobs et al., 2022; Martin-Chave et al., 2019).

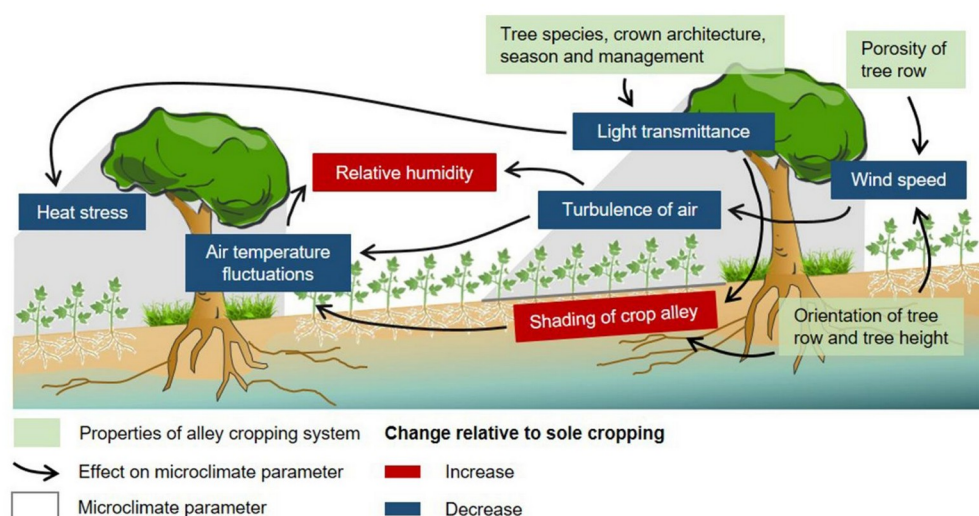


Figure 1: Effets de l'agroforesterie en allée intraparcellaire sur le microclimat. Les cases vertes représentent les propriétés des systèmes agroforestiers qui influencent les paramètres du microclimat. Leurs effets ainsi que les interactions entre les paramètres du microclimat sont indiqués par des flèches noires. La couleur de la case correspondant au paramètre microclimatique indique une augmentation (rouge) ou une réduction (bleu) par rapport à un système de culture unique. Source : Jacobs et al., 2022.

Parmi les impacts les plus importants, les arbres contribuent à une diminution du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) pouvant aller jusqu'à 42 % à proximité de rangées d'arbres (plantés selon une orientation nord-sud) dans un système agroforestier intraparcellaire (Gillespie et al., 2000). Une compétition pour la lumière peut arriver pendant la période de croissance des arbres et à l'inverse une complémentarité d'utilisation de la ressource lumineuse est possible si les cycles de croissance des légumes sont décalés par rapport à ceux des arbres (Dupraz & Liagre, 2019; Jacobs et al., 2022).

L'agencement des arbres impacte également la vitesse du vent (Figure 1) (Quinkenstein et al., 2009). Du côté sous le vent, la réduction du vent peut être constatée à une distance allant jusqu'à 12 fois la hauteur de la rangée d'arbres (Foereid et al., 2002). De plus, il a été trouvé qu'une porosité de canopée de 40 à 60 % est la plus efficace pour un effet brise-vent (Brandle et al., 2009; Jacobs et al., 2022).

De plus, en agroforesterie, les températures sont plus basses pendant la journée, jusqu'à 4 °C dans la partie la plus chaude des jours les plus chauds, mais plus élevées pendant la nuit comparées au plein soleil (Gosme et al., 2016). Ainsi, l'agroforesterie a le potentiel de limiter les risques de stress

thermique en réduisant l'amplitude quotidienne de la température (Gosme et al., 2016). Cet effet pourrait devenir plus pertinent dans le cadre du changement climatique, lorsque des sécheresses et des vagues de chaleur prolongées sont attendues (Reyes et al., 2021).

La présence d'arbres impacte également l'humidité relative de l'air sur la parcelle (Figure 1). En Allemagne, il a été observé une température de l'air et un déficit de pression de vapeur plus faibles dans les rangées de peupliers et à moins de 3 m des rangées d'arbres par rapport à un champ en plein soleil (Kanzler et al., 2019). La disponibilité de l'eau dans un système agroforestier peut être réduite pendant les sécheresses, car les arbres ont des taux de transpiration généralement plus élevés que ceux des cultures. Toutefois, cela n'a pas nécessairement un effet négatif sur la productivité du système agricole, car cette réduction peut être compensée par d'autres effets du microclimat et du bilan hydrique (Dupraz & Liagre, 2019; Jacobs et al., 2022).

La compréhension fine des interactions entre arbres et légumes permettrait de favoriser les complémentarités plutôt que les compétitions au moment de la conception et de la gestion du système de culture. En effet, le microclimat agroforestier est potentiellement intéressant, car il peut permettre une meilleure résistance des plantes à des événements climatiques extrêmes comme les sécheresses et les canicules amenées à être plus fréquentes dans un contexte de changement climatique (Jacobs et al., 2022; Reyes et al., 2021). Ce rapport traite de la problématique du microclimat agroforestier en s'intéressant au cas de la pomme de terre.

2.3 Caractéristiques de la pomme de terre

La pomme de terre (*Solanum tuberosum*) est une espèce herbacée, de la famille des Solanacées, originaire d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud (Rousselle et al., 1996). Ses stades de développement sont illustrés dans la Figure 2.

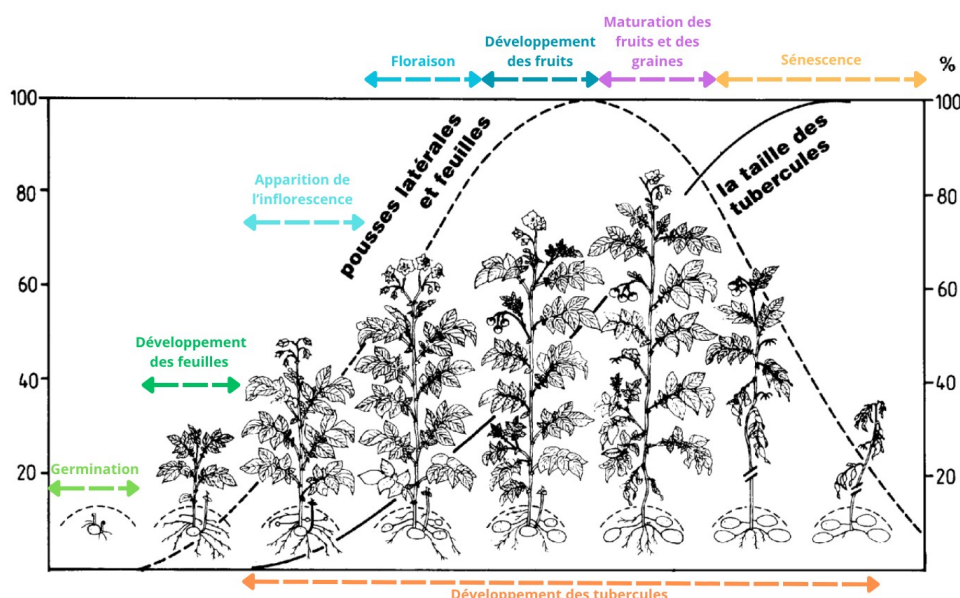


Figure 2: Stades de développement de la pomme de terre de la germination à la sénescence

Les quatre principaux déterminants du rendement en tubercules sont le nombre de plants/ha, le nombre de tiges/plante, le nombre de tubercules/tige et le poids moyen des tubercules (Struik et al.,

1990). Les différences de taille finale des tubercules sont dues à la compétition inter-plantes et intra-plantes (Rousselle et al., 1996).

En France, la culture de la pomme de terre se divise principalement en deux catégories : les primeurs et les variétés de conservation. Ces dernières, lorsqu'elles sont semées en avril dans la moitié sud du pays, nécessitent un apport en azote compris entre 160 et 215 kg par hectare (Arvalis, 2019). De plus, Arvalis estime qu'il y a une exportation de 1,5 kg de P_2O_5 et 6 kg de K_2O par tonne de tubercules exportés (Arvalis, 2004).

La problématique principale de la culture de pomme de terre biologique est la gestion de l'enherbement (Siddiqui et al., 2024). Les buttages après la plantation des tubercules permettent à la fois de désherber, mais aussi d'augmenter le volume de sol prospectable par les racines du plant de pomme de terre. Le faux semis avant plantation et le paillage permettent également de diminuer l'enherbement au cours de la saison de culture (Vennetzel, 2011). Le deuxième enjeu de la culture de pomme de terre biologique est la lutte contre les ravageurs, comme par exemple contre le doryphore qui est son principal ravageur (Vennetzel, 2011).

Le réchauffement climatique induit de plus hautes températures et plus de périodes de sécheresse (MedECC, 2020). Il est donc important de comprendre comment la pomme de terre réagit à la fois au stress thermique et au stress hydrique.

2.3.1 Réponse des pommes de terre aux risques liés au changement climatique

Réponses écophysiologiques aux températures extrêmes

La croissance et le développement de la pomme de terre sont influencés par la température. De fait, la température optimum de photosynthèse de la pomme de terre est 24 °C. De plus, la biomasse à la fin de la saison de culture est maximale quand la température de croissance est de 20 °C (Timlin et al., 2006).

Le nombre de tubercules par plant est défini pendant la phase de tubérisation qui est très perturbée, voir complètement inhibée dans les périodes où les températures minimales aériennes restent constamment supérieures à 20 °C (Hancock et al., 2014; Rousselle et al., 1996; Rykaczewska, 2015). De plus, plus la période de chaleur survient tôt, plus son impact sur la croissance et sur le rendement total est négatif (Rykaczewska, 2015).

Réponse écophysiologique au déficit hydrique

La pomme de terre est une culture très sensible au stress hydrique. En effet, le système racinaire relativement superficiel limite la zone explorée à une profondeur d'environ 80 cm, avec un prélèvement majoritaire de l'eau dans les 40 premiers cm (Djaman et al., 2021; Rousselle et al., 1996; Vennetzel, 2011). Selon les régions et les variétés, les consommations moyennes journalières en eau peuvent atteindre 4 à 5 mm/jour. Le recours à l'irrigation, suivant son positionnement au cours du cycle, permet d'assurer le bon déroulement de la phase de formation des tubercules ou d'assurer leur grossissement (Nasir & Toth, 2022; Vennetzel, 2011).

Une irrigation déficitaire influence à la fois l'évapotranspiration, l'efficacité d'utilisation d'eau des pommes de terre et leur rendement (Foti et al., 1995; Liu et al., 2006; Niu et al., 2024; Shock et al.,

1998; Walworth & Carling, 2002). Une diminution de 13 % à 65 % de rendement peut survenir s'il y a une diminution de la quantité d'eau irriguée (Alva et al., 2012; Karafyllidis et al., 1996; Patel & Rajput, 2007; Rolbiecki et al., 2015). Une relation linéaire positive entre l'évapotranspiration et le rendement en tubercule a été trouvée (Kiziloglu et al., 2006).

L'impact d'un déficit hydrique sur le rendement et ses composantes (nombre de tubercules par plant et poids des tubercules) dépend également du stade phénologique à partir duquel le déficit hydrique a lieu (Fabeiro et al., 2001; Hassan et al., 2002; Karam et al., 2014). Par exemple, une étude au Bangladesh a montré qu'un stress hydrique pendant les stades de stolonisation et de tubérisation de la variété Cardinal a eu une forte incidence négative sur le rendement de la pomme de terre par rapport à la phase de grossissement des tubercules (16 t/ha contre 21 t/ha) (Hassan et al., 2002). Il existe une forte variabilité des réponses physiologiques des pommes de terre au déficit hydrique en fonction des variétés, des types de sol, de la température, et du stade phénologique où intervient le déficit hydrique (Fabeiro et al., 2001; Gervais et al., 2021; Walworth & Carling, 2002).

2.3.2 Impact de l'agroforesterie sur la production de pommes de terre

Réponse écophysologique à une diminution du rayonnement

Comme vu précédemment, l'un des impacts majeurs de l'introduction d'arbres en parcelle maraîchère est l'introduction de zones ombragées ; or la diminution du rayonnement implique de nombreuses réponses physiologiques de la part des plants de pommes de terre (Tableau 1). Ainsi, le rendement est dans sa globalité diminué en conditions d'ombrage, bien que cette diminution dépende grandement des variétés de pomme de terre étudiées (Demagante & Vander Zaag, 1988; Gawronska et al., 1990; Schulz et al., 2019). À titre d'exemple, la variété Lemhi Russet est l'une des variétés les plus sensibles à l'ombrage, contrairement à la variété Désirée qui en est plus tolérante (Demagante & Vander Zaag, 1988; Gawronska et al., 1990). Une diminution de 44 % de rendement peut advenir sous un ombrage de 26 % à 50 % (Schulz et al., 2019).

Tableau 1: Synthèse des réponses écophysologiques de la pomme de terre à l'ombrage

Caractéristique impactée	Impact observé	Référence
Stades phénologiques	Allongement (jusqu'à 1211 degrés jours de l'initiation de la floraison à l'initiation de la sénescence sous 50 % d'ombrage)	Schulz et al., 2019
Hauteur des plants	Augmentation	Demagante & Vander Zaag, 1988
Diamètre des tiges	Réduction	
Biomasse	Réduction	Gawronska et al., 1990 ; Schulz et al., 2019
Nombre de tubercules	Réduction (jusqu'à une réduction par 10 du nombre de tubercules/plants à 50 % d'ombrage)	Chen, 2003 ; Demagante & Vander Zaag, 1988 ; Schulz et al., 2019
Matière sèche des tubercules	Réduction (17 à 44 % de la biomasse totale allouée aux tubercules sous faible intensité lumineuse contre 60 à 74 % sous forte intensité lumineuse)	Gawronska et al., 1990

Réponse écophysologique en microclimat agroforestier

L'allongement des tiges semble être une réponse fréquente des plantes en milieu agroforestier due à une diminution du rayonnement, cependant, elle ne fait pas consensus (Broyer, 2023; Gill et al., 2015; Sun & Dickinson, 1997; Verstraete, 2024). À titre d'exemple, dans le Sud de la France, les pommes de terre recevant un ombrage de 71 % pouvaient être jusqu'à 34 % plus grandes qu'en plein soleil (Verstraete, 2024). Cependant, au Bangladesh, sous des arbres d'akashmini (*Acacia auriculiformis*) de 4 ans, la hauteur des plants de pomme de terre est diminuée (45,5 cm) par rapport aux conditions de plein champ (47,3 cm) (Alam et al., 2015).

Les stades de développement de la pomme de terre sont également retardés en conditions agroforestières (Broyer, 2023; Verstraete, 2024). Dans le sud de la France, les pommes de terre ont présenté un retard significatif de développement pour un niveau d'ombrage de 55 % comparé au plein soleil (Broyer, 2023).

Certaines études ont montré que le nombre de tubercules par plant est diminué dans des conditions agroforestières en comparaison avec des conditions de plein champ (Broyer, 2023; Gill et al., 2015; Islam et al., 2015; Verstraete, 2024). À titre d'exemple, sous des peupliers de 5 ans en Inde, le nombre total de tubercules produits a diminué entre le plein champ (11,34 tubercules/plante) et l'agroforesterie (8,40 tubercules/plante). Les auteurs affirment que le nombre de tubercules par plante augmente avec l'incidence des rayonnements (Gill et al., 2015).

Il n'y a pas de consensus sur les rendements de la pomme de terre en agroforesterie comparés à des conditions de plein champ. Une diminution de rendement comprise entre 10 % et 34 % a été mesurée dans les études suivantes : Alam et al., 2015; Gill et al., 2015; Pardon et al., 2018. D'autres études montrent que les rendements sont améliorés dans certaines conditions agroforestières entre 7 % et 33 % (Barbeau et al., 2018; Sun & Dickinson, 1997). Dans le sud de la France, en 2023, comparé au plein soleil, la production commercialisable de pommes de terre est diminuée significativement de 52 % sur la modalité élaguée (55 % d'ombrage) et est augmentée

significativement de 24 % sur la modalité têtard (46 % d'ombrage) (Broyer, 2023). Sur ce même site expérimental en 2024, comparé à la modalité en plein soleil, la production commercialisable est diminuée de 40 % en têtard et de 48 % en élagué (Verstraete, 2024).

Mis à part le nombre de tubercules/plants, la réponse écophysiological de la pomme de terre n'est pas similaire dans toutes les études scientifiques. Cette réponse est sûrement due à d'autres facteurs tels que les conditions pédoclimatiques, ou les variétés de pomme de terre cultivées (Gervais et al., 2021; Pardon et al., 2018). Il est important de noter qu'une seule étude scientifique accessible et deux rapports de stage ont été trouvés concernant la culture de pomme de terre en milieu tempéré avec des arbres matures (Broyer, 2023; Pardon et al., 2018; Verstraete, 2024). Par contre, aucune étude ne traite de la réponse des pommes de terre en agroforesterie dans un contexte de stress hydrique. Il y a donc un grand manque de connaissances quant à cette culture en agroforesterie mature en milieu tempéré dans des conditions limitantes en eau.

3 Problématique, hypothèses et démarche

Face au manque de connaissances sur le comportement de la pomme de terre en systèmes agroforestiers en contexte de stress hydrique souligné dans l'état de l'art, ma problématique de stage est la suivante :

Comment l'agroforesterie impacte-t-elle les performances agronomiques de la pomme de terre (Solanum tuberosum) sous deux régimes d'irrigation en climat méditerranéen ?

Cette problématique a été décomposée en trois questions sous-jacentes, auxquelles sont adossées des hypothèses :

1/ *Quelles sont les modifications microclimatiques provoquées par la présence d'arbres et par leur modalité de taille ?*

- a) La présence d'arbres sur la parcelle modifie le microclimat par la réduction des rayonnements, et un effet tampon sur la température et l'humidité relative de l'air.
- b) Cet effet est d'autant plus marqué que la majorité de la canopée est conservée.

2/ *Quelles sont les réponses écophysiologiques de la pomme de terre fortement irriguée aux modifications du microclimat, notamment concernant sa croissance, son développement et son rendement ?*

- a) Les modifications du microclimat proche des arbres induisent un retard de développement de la pomme de terre et modifient ses paramètres de croissance.
- b) La présence d'arbres en intraparcellaire a un effet positif sur les rendements en tubercules de la pomme de terre.

3/ *Quelles sont les réponses de la pomme de terre moins irriguée aux modifications du microclimat, notamment concernant son rendement ?*

- a) Le microclimat agroforestier favorise le rendement des pommes de terre moins irriguées par rapport à des conditions de plein soleil moins irrigué.

Ces différentes hypothèses ont été testées dans le cadre du projet Arbratatouille 3 par des suivis microclimatiques et agronomiques sur 2 sites situés en contexte méditerranéen : les Terres de Roumassouze à Vézénobres dans le Gard (30) et la Ferme du Colibri au Thor dans le Vaucluse (84).

4 Matériel et méthodes

4.1 Les Terres de Roumassouze

4.1.1 Caractéristique générale du site et matériel biologique

Les Terres de Roumassouze est un site expérimental agroforestier en agriculture biologique (AB) appartenant à Agroof et situé à Vézénobres (44°03'28"N 4°06'40"E). Le site se situe à 103 mètres d'altitude. Les précipitations d'avril à juillet 2025 mesurées sont de 139 mm (Meteociel, 2025b). Le site s'étend sur 11 ha (dont 3 ha en maraîchage) et accueille une diversité de peuplements agroforestiers implantés en grande majorité par l'INRAE en 1996 (Figure 3). Suite au départ des maraîchers installés récemment sur les terres, Agroof a initié l'exploitation du site expérimental en 2025.



Figure 3: Terres de Roumassouze - Photographie aérienne globale des dispositifs expérimentaux du site (Google Earth).

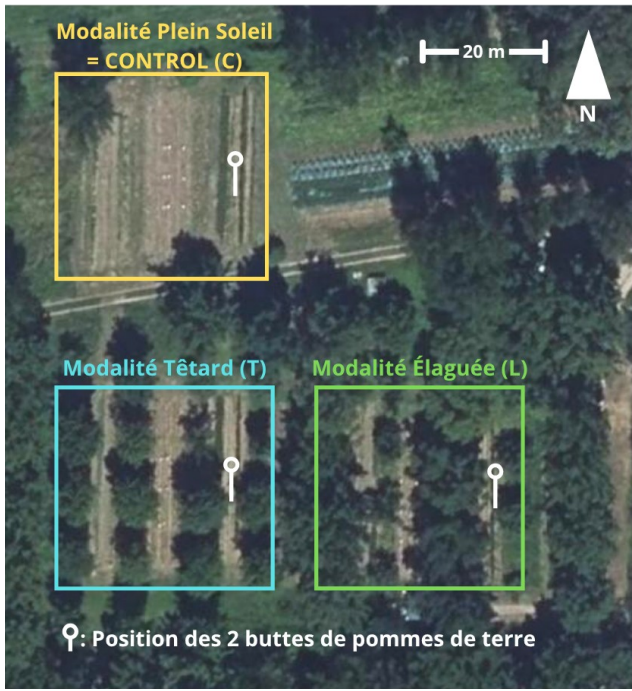
Les parcelles étudiées, nommées « dispositif Arbratatuille 3 », recouvrent 2700 m² au total (Figure 3). Le sol est sablo-limoneux avec un pH de 8, une teneur en matière organique de 2,5 à 2,75 %. D'après les études de sol réalisées en 2023, l'ensemble de la parcelle est homogène. Le site est bordé par le Gardon à l'ouest du site. L'accès à l'eau se fait par un forage qui donne accès à la nappe alluviale du Gardon qui affleure à 2 mètres sous la surface du sol.

L'expérimentation a lieu sur un système agroforestier composé de noyers hybrides (*Juglans regia* x *Juglans nigra*) implantés en 1996 à 100 arbres/ha (10 m entre les rangées et 10 m dans la rangée) et orientés nord-sud. Une bande enherbée spontanée est conservée sur les lignes d'arbres. Elle a été broyée deux fois pendant la saison de culture.

Trois modalités de microclimat dont deux modalités agroforestières ont été étudiées (Figure 4 ; Figure 5).

- Modalité élaguée (L) : une ligne sur deux présente des noyers hybrides plantés en 1996 qui mesurent en moyenne 18 mètres de haut. Sur l'autre ligne, des rejets de cépée de noyer hybrides ont été sélectionnés. Ils font en moyenne 7 mètres de haut. Tous ces noyers sont caractérisés par la taille des branches charpentières les plus basses.
- Modalité têtard (T) : les houppiers de ces noyers ont été têtardisés, c'est-à-dire taillés en 2023 et 2025 autour des principales branches charpentières. Les noyers mesurent en moyenne 8 mètres de haut.
- Modalité control (C) c'est-à-dire sans arbre en plein soleil conduite depuis 2015 de la même manière que les modalités agroforestières.

Au sein de chaque modalité agroforestière, deux buttes de cultures orientées nord-sud accueillent des pommes de terre (Figure 4). Pendant l'été 2024, des pommes de terre étaient cultivées sur les buttes de cultures actuelles. Un engrais vert d'hiver a été implanté après leur récolte, et broyé et incorporé sur 10 cm en mars 2025. À cette même période, deux faux semis ont été réalisés avant la plantation et la fertilisation a été assurée en 2 apports de 4,5 kg/rang le 26 mars et 1,75 kg/rang le 1^{er} avril de fertilisant organique (Ovitonic, NPK = 4-3-10). Dans chaque butte, deux rangées de pommes de terre ont été plantées le 1^{er} avril avec un écartement de 20 cm au sein de la rangée et de 50 cm inter-rangée. Les buttes ont été paillées sur 30 cm de hauteur avec de la paille produite sur le site. Sous le paillage, les goutte-à-gouttes ont été disposés suivant les modalités d'irrigation (Figure 5). L'itinéraire technique de la culture de pomme de terre sur les Terres de Roumassouze est récapitulé en annexe 2 (p. 67)



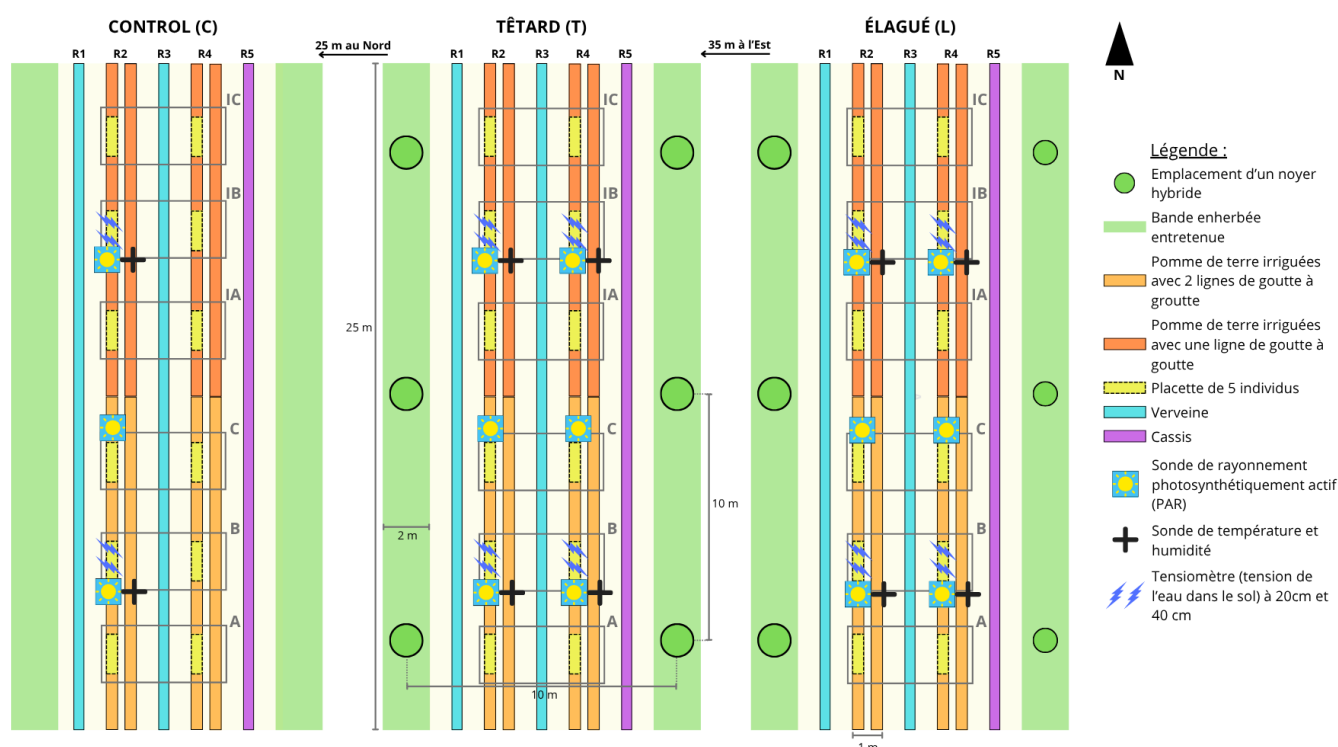
4.1.2 Dispositif expérimental

Deux modalités d'irrigations ont été imposées aux pommes de terre (Figure 5, Tableau 2) : une irrigation complète avec deux lignes de goutte-à-gouttes dans le sud de la butte sur 12 mètres, et une irrigation deux fois moins importante avec une ligne de goutte-à-goutte dans le nord de la butte sur 12 mètres.

Tableau 2: Terres de Roumassouze : Quantité d'eau apportée par butte (L) pour chaque modalité agroforestière

AF	Quantité d'eau irrigué (L)		
	Pleine irri	Demi irri	TOTAL
C	4 136	2 068	6204
T	1 787	893	2680
L	1 679	836	2518

Malgré le fait que les changements microclimatiques peuvent être très dépendants de la position par rapport aux arbres, seule la comparaison entre les modalités de conduite des arbres et la comparaison entre les modalités d'irrigation sont présentées dans cette étude.



Au sein de chaque modalité C, T et L, différents suivis microclimatiques et agronomiques en conditions irriguées ou non ont été réalisés (Tableau 4). Seule une rangée par butte a fait l'objet de suivis. Sur chaque butte et chaque type d'irrigation, les mesures de croissance, de développement et de rendement ont été réalisées sur 15 individus répartis sur 3 placettes de 5 plants, soit 30 individus par modalité agroforestière x irrigation. Une synthèse du dispositif expérimental mis en place sur ce site pour les suivis agronomiques est présentée dans le Tableau 4.

Des suivis microclimatiques ont été réalisés dans le but d'étudier les différences selon les modalités agroforestières et d'irrigation (Figure 5). Deux buttes de pommes de terre sont équipées de dispositifs microclimatiques en Élaguée et Têtard, et une butte est équipée en Control.

4.2 Ferme du Colibri

4.2.1 Caractéristique générale du site et matériel biologique

La Ferme du Colibri est située au Thor (43°94'18"N, 4°97'41"E). L'exploitation certifiée en agriculture biologique s'étale sur 1,5 ha, dont 9300 m² en maraîchage biologique, 1200 m² d'arboriculture, et 200 m² de tunnel froid. Des figuiers, pommiers, et poiriers ont été plantés par l'agriculteur en 2012 en rangs intraparcels de 80 à 100 m de long avec une largeur inter-rang de 12 m et une distance entre 7 et 10 m entre chaque arbre (Figure 6). Des haies plurispécifiques

comprenant des noisetiers et des pruniers myrobolans ont également été plantées en 2012 en alternance avec des rangs de fruitiers. L'orientation est-ouest des haies permet de limiter les effets du vent (zone de mistral et de vent du nord) (Figure 6). La ferme se situe à 46 m d'altitude et l'accès à l'eau est réalisé par forage. Le sol est limono-sableux et calcaire avec un pH de 8,5, pour un taux de matière organique de 4,7 % selon l'analyse de sol réalisée en 2018. L'ensemble des sols des parcelles est homogène. Les sols sont maintenus couverts ou enherbés toute l'année. La pluviométrie de mars à juillet 2025 est de 231 mm à Avignon (Meteociel, 2025a).



Figure 6: Ferme du Colibri - Photographie aérienne de l'exploitation et des parcelles de pommes de terre étudiées. Flèches vertes : alignements de figuiers et pommiers. Flèches oranges : alignement de figuiers et de poiriers. Flèche bleue : haie pluri-spécifique composé principalement de noisetiers et de pruniers myrobolans (Source : géoportail, 06-2024).

L'expérimentation a lieu sur une planche de pommes de terre de variété « Désirée » située entre une rangée de figuiers et de pruniers espacés de 10 m au nord et une haie multi-espèces et brise-vent composée de pruniers myrobolans et de noisetiers au sud. La planche de pommes de terre contient 10 buttes.

L'itinéraire technique de la culture de pomme de terre sur la Ferme du Colibri est récapitulé en annexe 2 (p. 67).

4.2.2 Dispositif expérimental

Deux contextes microclimatiques et d'irrigation sont étudiés de la même manière (Figure 7, Tableau 4, Tableau 3) :

- **AF-Haie** est une parcelle de 90 m x 11 m au nord d'une haie plurispécifique hétérogène mesurant entre 2,6 et 7,7 m de haut. Deux modalités d'irrigation sont présentes sur cette planche : une irrigation complète sur une grande partie de la planche, et une irrigation une fois sur deux (demi-irrigation) en bout de rang sur environ 11 m. Dans la modalité « pleine irrigation », 3 placettes de 5 plants sont suivies, et dans la modalité « demi-irrigation », 15 individus consécutifs ont été suivis. Les rangées de pommes de terre suivies sont les rangées R1, R2, R4 et R5 à une distance de 1.8 m, 2.7 m, 3.5 m et 4.4 m respectivement de la haie. La distance à l'arbre et l'effet de l'irrigation déficitaire sont étudiés.
- **Témoin** est une parcelle en plein soleil au sud de l'exploitation. Deux rangées de pommes de terre y sont plantées. Les pommes de terre sont gérées comme sur la parcelle AF-Haie. La distance à l'arbre et l'effet du type d'irrigation sont étudiés.

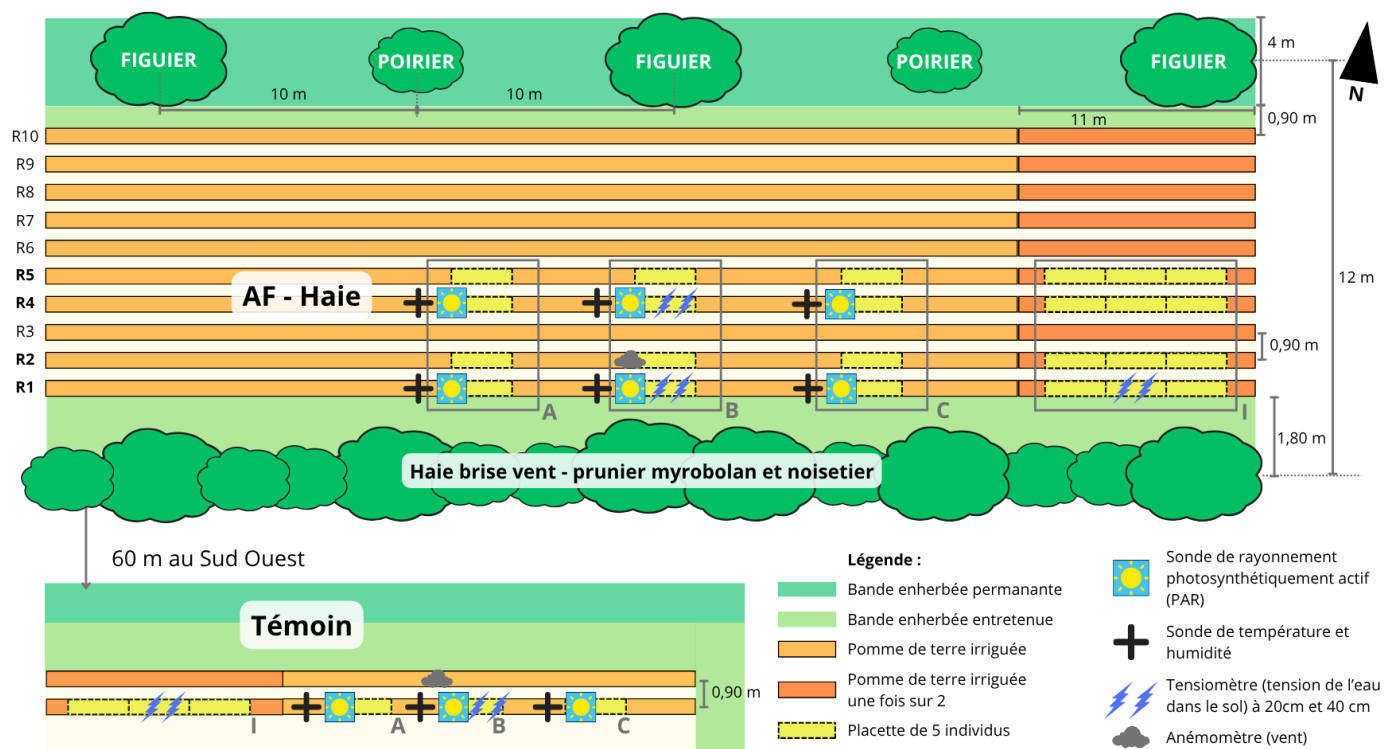


Figure 7: Ferme du Colibri - Dispositif expérimental pour les suivis agronomiques et microclimatiques (pas à l'échelle)

Une synthèse du dispositif expérimental mis en place sur ce site pour les suivis agronomiques est présentée dans le Tableau 4.

La quantité d'eau apportée suivant les distances aux arbres et le type d'irrigation est explicitée dans le Tableau 3.

Les dispositifs climatiques sont positionnés dans la modalité AF-Haie de façon à avoir des mesures à l'ombre de la haie (R2), au centre de la parcelle agroforestière (R4) et en témoin, avec à chaque fois 3 répétitions (Figure 7).

Tableau 3: Ferme du Colibri : Quantité d'eau apportée (en L) par rang par mètre linéaire de pomme de terre

Rang	Quantité d'eau irrigué (en L/mètre linéaire)	
	Pleine irri	Demi-irri
AF	278	133
Témoin	187	43

Tableau 4: Dispositifs expérimentaux mis en place pour les suivis agronomiques

Site expérimental	Les Terres de Roumassouze	La Ferme du Colibri
Variétés étudiées	Charlotte	Désirée
Caractéristiques de la variété	Plante de taille moyenne Demi-précoce Tubercule allongé, moyen à chair et peau jaune	Plante haute Moyenne à demi-tardive Tubercule oblongue, gros à chair jaune et peau rouge
Rendement potentiel moyen	59 t/ha	59 t/ha
Dispositif expérimental	2 modalités en AF (Elagué et Têtard) et une modalité en plein soleil (Control) 2 buttes / modalité 2 régimes d'irrigation / butte (une dose et une demi dose) 3 placettes / régime d'irrigation 5 plantes/placette	Gradient de 4 rangs et un rang en plein soleil (Témoin) 2 régimes d'irrigation (irrigation chaque fois et irrigation une fois sur deux) 3 placettes / régime d'irrigation 5 plantes/placette
Nombre d'individus étudiés	180	150
Type d'installation	Noyer hybride Elagué : ~ 7 ou 18 m de haut Têtard : ~ 8 m de haut	Au Nord d'une haie prunier et noisetier 3 à 7,5 m de haut
Effet étudié	Modalité agroforestière 2 régimes d'irrigation	Distance à la haie 2 régimes d'irrigation

4.3 Variables d'études sur les deux sites expérimentaux

4.3.1 Caractérisation du microclimat et du paysage

L'évaluation du microclimat est réalisée via la collecte de données atmosphériques (hygrométrie et température) issues d'enregistreurs autonomes VOLTcraft © situés sous abri et installés fin juin. Ces sondes ont enregistré la température et l'humidité toutes les 10 minutes (Tableau 5).

Des capteurs de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), des anémomètres, et des tensiomètres à deux profondeurs (20 et 40 cm) ont également été mis en place, reliés à des boîtiers autonomes PEPPIAF à partir de mi-mai (Tableau 5). L'ensemble des capteurs ont été placés à 0,8 m de haut et ont enregistré les données atmosphériques toutes les 10 minutes jusqu'à la fin de la saison de culture. Le PAR désigne le rayonnement dont les longueurs d'ondes sont comprises entre 400 et 700 nm, autrement dit les longueurs d'ondes pouvant être utiles à la photosynthèse des plantes (« Photosynthetically Active Radiation », 1981). Les résultats des tensiomètres n'ont pas été analysés sur la Ferme du Colibri à cause de valeurs aberrantes probablement causées par une mauvaise installation du matériel.

L'ouverture de canopée des arbres a été mesurée sur les deux sites expérimentaux (Tableau 5). Les photographies ont été prises au niveau de chaque placette de culture à 0,8 m du sol avec un objectif hémisphérique (Fish Eye) juste avant le coucher du soleil, lorsque les arbres étaient au stade de

pleine feuille. Ces photographies ont ensuite été traitées avec le logiciel CANEYE et l'ouverture de canopée en pourcentage a été extraite.

Tableau 5: Récapitulatif des dates de début de collecte par site expérimental et par mesure microclimatique

Site expérimental	Température et humidité de l'air	PAR, tension hydrique, anémomètre	Overture de canopée	Disposition du microclimat
Terres de Roumassouze	24 juin	15 mai	8 juillet	Figure 5
Ferme du Colibri	1 juillet	7 mai	28 juillet	Figure 7

4.3.2 Croissance et développement des pommes de terre

À partir du 7 mai à la Ferme du Colibri et du 15 mai aux Terres de Roumassouze, les plants de pommes de terre des deux sites expérimentaux ont été suivis toutes les deux semaines jusqu'à l'entrée en sénescence des plants. Pour chaque individu, sont relevés à chaque passage le stade phénologique (Hack, 1993), deux diamètres perpendiculaires (en cm) des plants, la longueur (en cm) de la tige la plus haute et le nombre de tiges. Le code utilisé pour les stades de développement est énoncé dans l'annexe 3 (p. 68). À chaque passage, une note sur l'état sanitaire de l'ensemble de chaque plant a été attribuée visuellement en suivant le Tableau 6. Une fois par site expérimental, après le stade de pleine floraison (mi-juin) la masse surfacique des feuilles (LMA, Leaf Mass per Area) et la teneur en matière sèche de 4 folioles réparties sur des feuilles dirigées vers les points cardinaux ont été calculées. Sur les placettes de 5 individus, les individus 1, 3 et 5 ont été échantillonnés. La masse surfacique des feuilles est un indicateur de croissance mesuré en g.cm^{-2} , c'est le rapport entre la masse sèche d'une feuille par rapport à sa surface. Les feuilles ayant une LMA élevée ont un limbe plus épais ou des tissus plus denses, ou les deux (Wright et al., 2004).

Tableau 6: Classe de dégât et code correspondant

Code pour la classe de dégât	Classe de dégât
1	0 à 1 %
2	2 à 9 %
3	10 à 19 %
4	20 à 49 %
5	Plus de 50 %

4.3.3 Rendement et valeur commerciale

Au moment de la récolte, la production brute et nette (production commercialisable) de chaque individu suivi est évaluée. La production brute représente le poids de l'ensemble des tubercules produits par la plante. Le nombre total de tubercules par plante suivie a été compté et les tubercules non commercialisables retirés. La production commercialisable est le poids des tubercules par plante après le tri des tubercules non commercialisables. La production nette est décomposée en deux classes de commercialisation selon l'arrêté du 3 mars 1997 avisé par le Comité National Interprofessionnel de la Pomme de Terre (Arrêté du 3 mars 1997 relatif au commerce des pommes de terre de primeur et des pommes de terre de conservation, 1997). La classe 1 étant de meilleure qualité commerciale que la classe 2, pouvant présenter quelques défauts. Puis, les tubercules de chaque individu ont été calibrés selon les critères de sélection tirés de la norme CEE-ONU FFV-52 concernant la commercialisation et le contrôle de la qualité commerciale des pommes de terre

Tableau 7: Échelle de calibrage

<35 mm
35-45 mm
45-55 mm
>55 mm

primeurs et de conservation (Nations-Unis, 2006). L'échelle de calibrage choisie est expliquée dans le Tableau 7. L'efficacité d'utilisation de l'eau par plante a été calculée après la récolte au regard de l'estimation de l'eau apportée par modalité (Tableau 2, Tableau 3).

4.4 Méthode de traitement statistique

Chaque site expérimental a été analysé indépendamment sur R. Les données de croissance et de développement ont été analysées uniquement pour les plants ayant été soumis à la pleine irrigation, alors que les rendements ont été analysés au regard des deux modalités d'irrigation.

Des modèles linéaires ont été utilisés pour analyser (i) les effets du système agroforestier (modalités agroforestière sur les Terres de Roumassouze ou Distance à la haie sur la ferme du Colibri), (ii) le type d'irrigation (pleine ou demi-irrigation) et (iii) les interactions entre eux. Pour tous les tests effectués, un risque α de 5 % a été fixé. Une analyse de variance (ANOVA) de chaque modèle a été effectuée lorsque la normalité résiduelle et l'homoscédasticité des résidus étaient satisfaites selon le test de Shapiro-Wilk et l'analyse graphique des résidus. Si au moins une de ces conditions n'était pas remplie, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été effectué. Des analyses post-hoc avec le test de Tukey ou de Dunn avec l'ajustement de Bonferroni ont été effectuées après l'ANOVA et le test de Kruskal-Wallis, respectivement. Des régressions linéaires ont été réalisées pour étudier la corrélation entre l'ouverture de canopée et certaines variables comme la LMA.

5 Résultats

5.1 Les terres de Roumassouze

5.1.1 Caractérisation du microclimat

5.1.1.1 Rayonnement et ouverture de canopée

L'ouverture de canopée moyenne en juillet est de 93,4 % pour C, 66,2 % pour T et 42,5 % pour L (Tableau 8). Ainsi la canopée en T est 31 % plus fermée qu'en C, et celle en L est 51 % plus fermée qu'en C. De plus, la modalité Control présente le cumul des rayonnements photosynthétiquement actifs (PAR) le plus important avec 667414,3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ contre 385990,5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ pour T et 259675,2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ pour L. Ainsi, le T et le L ont reçu respectivement 57 % et 39 % de PAR par rapport à ce qu'a reçu le Control (Tableau 8). La Figure 8A rend compte du PAR moyen de chaque modalité en fonction des mois de la saison de culture. Le pic d'ensoleillement est atteint entre 13h et 14h pour le C et le T et à midi pour le L. De plus, le maximum des pics d'ensoleillement au cours des mois diminue. Cette évolution est plus nette en T qu'en L. La dynamique journalière d'ensoleillement diffère selon les modalités agroforestières (Figure 8B). Sur toute la période de culture, l'écart au Control est de l'ordre de 60 % à 11 h et de 45 % à 18 h pour le Têtard, alors qu'il est de l'ordre de 60 % à 11 h, de 70 % à 16 h et de 40 % à 19 h pour l'Élaguée. Ainsi, suivant les modalités, les pommes de terre sont à l'ombre pas au même moment de la journée (Figure 8).

Tableau 8: Terres de Roumassouze : Récapitulatif de l'ouverture de canopée $\pm$ erreur standard (%) et cumul des rayonnements photosynthétiquement actifs (PAR) moyen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) en fonction des modalités agroforestières. ANOVA, Ouverture de canopée $\sim$ AF, p-value = 2,2 e-16, α = 5 %. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités.

AF	Ouverture de canopée $\pm$ SE (%) (Tukey)	Cumul de PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$)
C	93,4 $\pm$ 0,508 (a)	667414,3
T	66,2 $\pm$ 2,32 (b)	385990,5
L	42,5 $\pm$ 2,12 (c)	259675,2

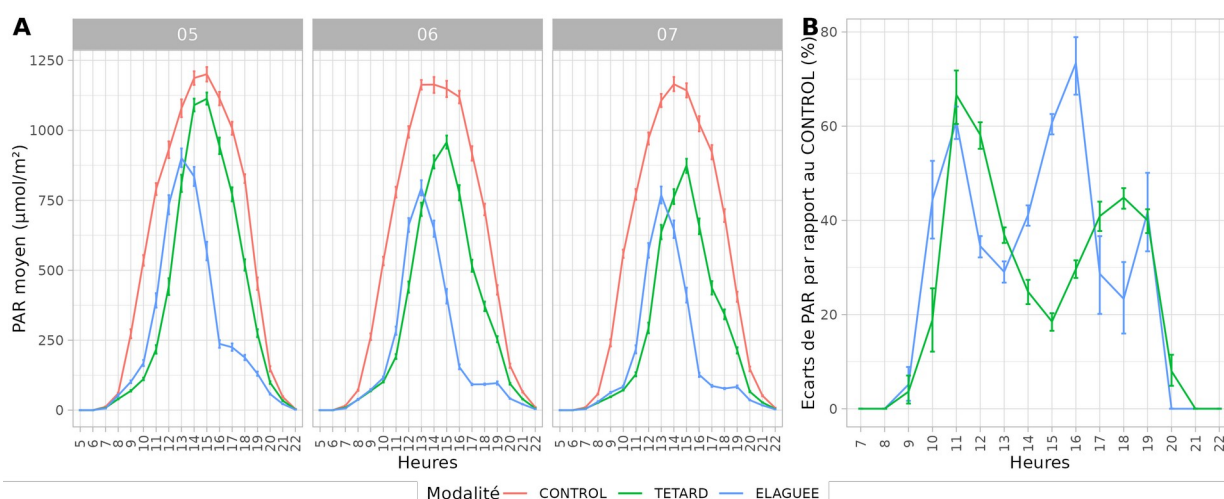


Figure 8: Terres de Roumassouze : A - Rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) moyen par heure (en $\mu\text{mol}/\text{m}^2$) pour mai (05), juin (06) et juillet (07).

B - Ecart de PAR moyen par heure par rapport au Control (en %).

Le Control (C) est en rouge, le Têtard (T) est en vert et l'Élaguée (L) est en bleu. Barre d'erreur = erreur standard

5.1.1.2 Température et humidité relative

Les températures moyennes varient peu entre les modalités de conduite des arbres (Tableau 9). La Figure 9A rend compte de l'écart de température au Control au cours d'une journée. Les modalités T et L ont une température supérieure à C de 19 h à 7 h. Pendant la journée, les températures sont inférieures en T et L qu'en C. L'écart maximal entre le C et le T est atteint à 9 h et à 16 h pour le L (2,5°C en moins pour le T et L comparés au C) (Figure 9A). Les amplitudes de température journalières sont significativement faibles en L (16,14 °C ± 0,48), intermédiaires en T (17,61 °C ± 0,49) et élevées en C (18,69 °C ± 0,48) (Tableau 9).

L'humidité relative moyenne journalière varie peu en fonction des modalités de conduite des arbres (Tableau 9). Le T et L sont inférieurs au C la nuit de 19 h à 8 h d'environ 2,5 %. Pour le T, le plus grand écart au Control est atteint à 9 h (T est supérieur à C de 8 %) et il est atteint à 16 h pour le L (L supérieur à C de 5 %) (Figure 9B).

Tableau 9: Terres de Roumassouze : Températures moyennes (°C), amplitudes de température moyenne (°C) et humidité relative moyenne (%) ± erreur standard pour les modalités agroforestières. Pour l'amplitude de température, Kruskal-Wallis, Amplitude ~ AF, p-value = 1,0 e-3, $\alpha = 5\%$. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités.

AF	Température moyenne ± SE (°C)	Amplitude de température moyenne ± SE (°C) (Dunn)	Humidité relative ± SE (%)
C	23,42 ± 0,07	18,69 ± 0,48 (a)	65,31 ± 0,29
T	23,27 ± 0,04	17,61 ± 0,49 (b)	65,99 ± 0,14
L	23,31 ± 0,04	16,14 ± 0,48 (c)	65,91 ± 0,14

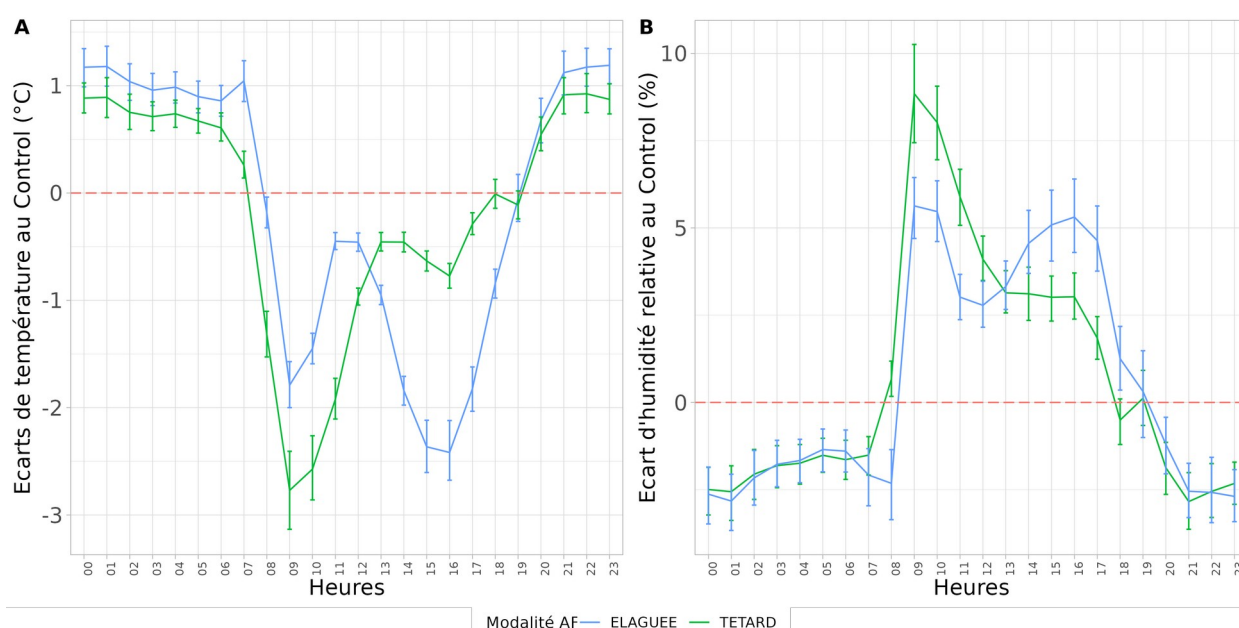


Figure 9: Terres de Roumassouze : A - Ecart des températures moyennes horaire (°C) au Control en fonction des heures de la journée.

B - Ecart de l'humidité relative moyenne horaire (%) au Control.

Le Têtard (T) est en vert et l'Élaguée (L) est en bleu. Barre d'erreur = erreur standard. La ligne en pointillé rouge y=0 représente la modalité Control.

5.1.1.3 Tension hydrique dans le sol

La tension hydrique du sol dépend de la modalité d'irrigation et de la modalité agroforestière de manière significative (Figure 10). La tension hydrique augmente régulièrement au cours de la saison de culture, c'est-à-dire que le sol est plus sec en juillet qu'en mai. Pour ce qui est de la pleine irrigation, la tension hydrique est faible en C, intermédiaire en T et élevée en L (C : 34,50 kPa $\pm$ 0,08 ; T : 36,20 kPa $\pm$ 0,09 ; L : 44,85 kPa $\pm$ 0,11) (Tableau 10). Pour la demi-irrigation, la tension hydrique du sol est faible en L, intermédiaire en T et élevée en C (L : 33,69 kPa $\pm$ 0,08 ; T : 43,06 kPa $\pm$ 0,09 ; C : 44,60 kPa $\pm$ 0,10). Au sein de chaque modalité agroforestière, on s'attend à avoir une tension hydrique supérieure en demi-irrigation qu'en pleine irrigation, ce qui est le cas en T et C. Cependant en L, la pleine irrigation a une tension hydrique supérieure à la demi-irrigation, ce qui revient à dire que le sol est plus humide quand l'irrigation est deux fois moins importante (Tableau 10).

Tableau 10: Terres de Roumassouze : Tensions hydriques moyennes du sol $\pm$ erreur standard (kPa) et l'estimation de la quantité totale d'eau apportée sur toute la saison de culture (en L) pour les modalités agroforestières et d'irrigation. Kruskal-Wallis, moyenne tensionmètre $\sim$ AF * irrigation, p-value < 2.2 e-16, α = 5 %. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités.

AF	Irri	Moyenne des tensions hydriques $\pm$ SE (kPa) (Dunn)	Estimation quantité d'eau apportée (L)
C	Demi	44,60 $\pm$ 0,10 (a)	2068
	Pleine	34,50 $\pm$ 0,08 (b)	4136
T	Demi	43,06 $\pm$ 0,09 (c)	893
	Pleine	36,20 $\pm$ 0,09 (d)	1787
L	Demi	33,69 $\pm$ 0,08 (e)	839
	Pleine	44,85 $\pm$ 0,11 (f)	1679

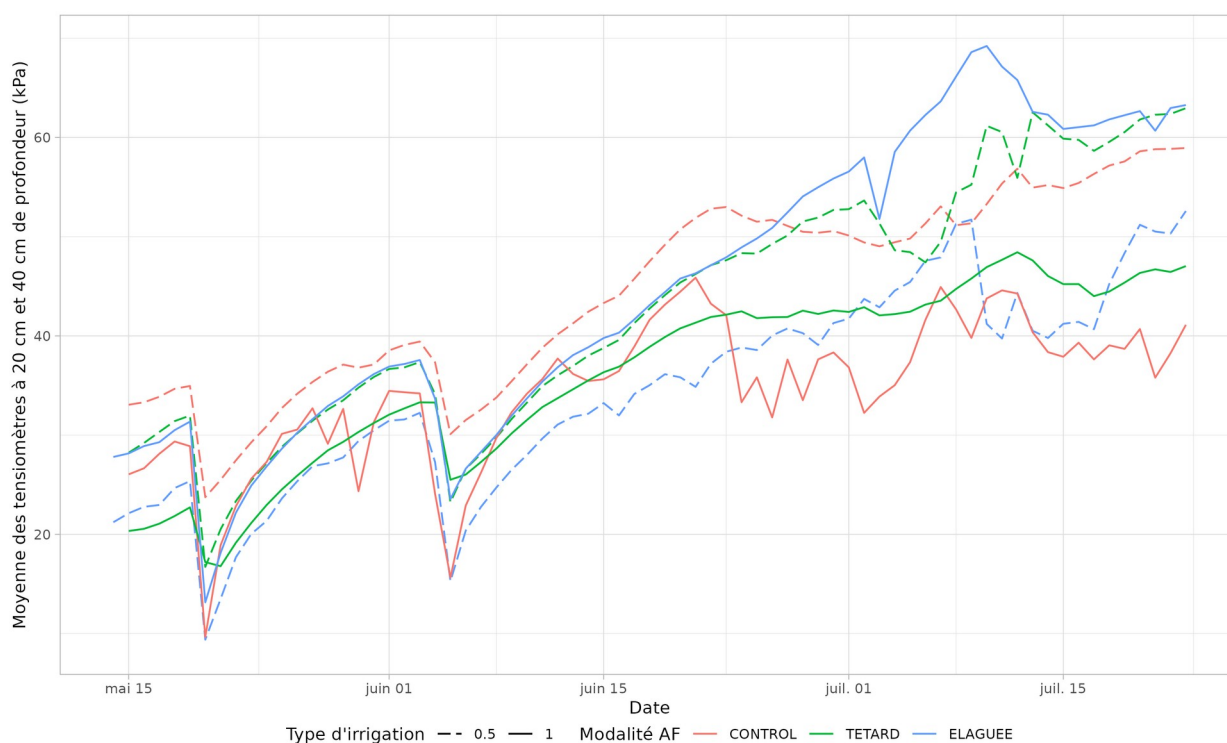


Figure 10: Terres de Roumassouze : Évolution de la tension hydrique du sol pour les modalités agroforestières et d'irrigation au cours de la saison de culture. Le Control (C) est en rouge, le Têtard (T) en vert et Élaguée (L) en bleu. La demi-irrigation (0.5) est représentée en pointillé et la pleine irrigation (1) est représentée en trait plein.

5.1.2 Performances agronomiques

5.1.2.1 Croissance

La hauteur des plants augmente progressivement pour atteindre sa valeur maximale le 11 juin 2025 (Figure 11A). Ce même jour, les plants en T ont une hauteur significativement inférieure à celle en C et L (Tableau 11). Au cours de la saison de culture, les pommes de terre significativement plus vigoureuses sont en C, suivies de celles en L, suivies de celles en T en pleine irrigation (Figure 11B, Tableau 11).

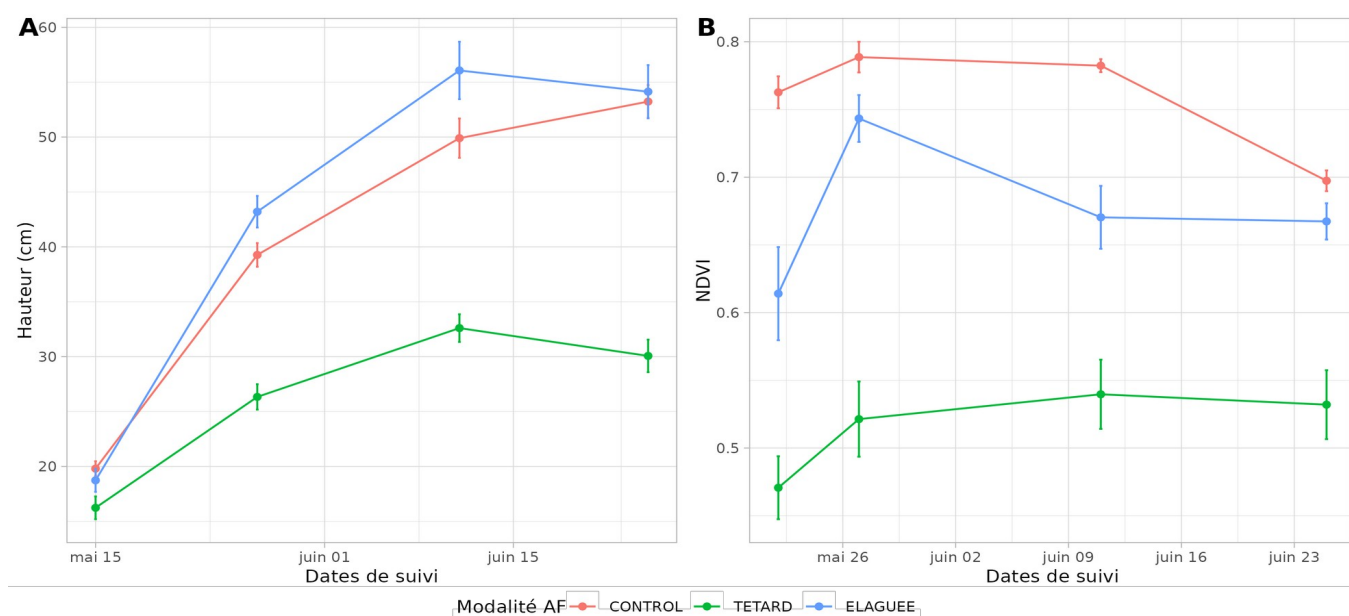


Figure 11: Terres de Roumassouze : A – Évolution de la hauteur des pommes de terre pour les différentes modalités agroforestières en pleine irrigation.

B – Évolution de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) moyen (%) en pleine irrigation pendant la saison de culture. Le Control (C) est en rouge, le Têtard (T) en vert et l'Élaguée (L) en bleu. Barre d'erreur = erreur standard.

Tableau 11: Terres de Roumassouze : Hauteur moyenne (cm) le 11 juin 2025 et indice de végétation par différence normalisée (NDVI) moyen $\pm$ erreur standard pour la pleine irrigation. Les p-values des tests de Kruskal-Wallis et ANOVA (variable à expliquer ~ AF, $\alpha=5\%$) sont présentés. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités.

AF	Hauteur le 11-06 $\pm$ SE (cm) (Tukey)	NDVI $\pm$ SE (%) (Dunn)
C	49.1 $\pm$ 1.5 (a)	75.77 $\pm$ 0.56 (a)
T	36.1 $\pm$ 1.3 (b)	51.59 $\pm$ 1.28 (b)
L	52.3 $\pm$ 1.7 (a)	67.37 $\pm$ 1.23 (c)
Test statistique et p-value	ANOVA, p-value=1.247e-12	Kruskal-Wallis, p-value < 2.2e-16

La masse surfacique foliaire (LMA) dépend uniquement des modalités agroforestières. La masse surfacique moyenne en L est significativement inférieure à celles en T et en C. De plus, une corrélation positive existe entre la LMA et l'ouverture de canopée avec un coefficient de corrélation de 0,141 (Figure 12).

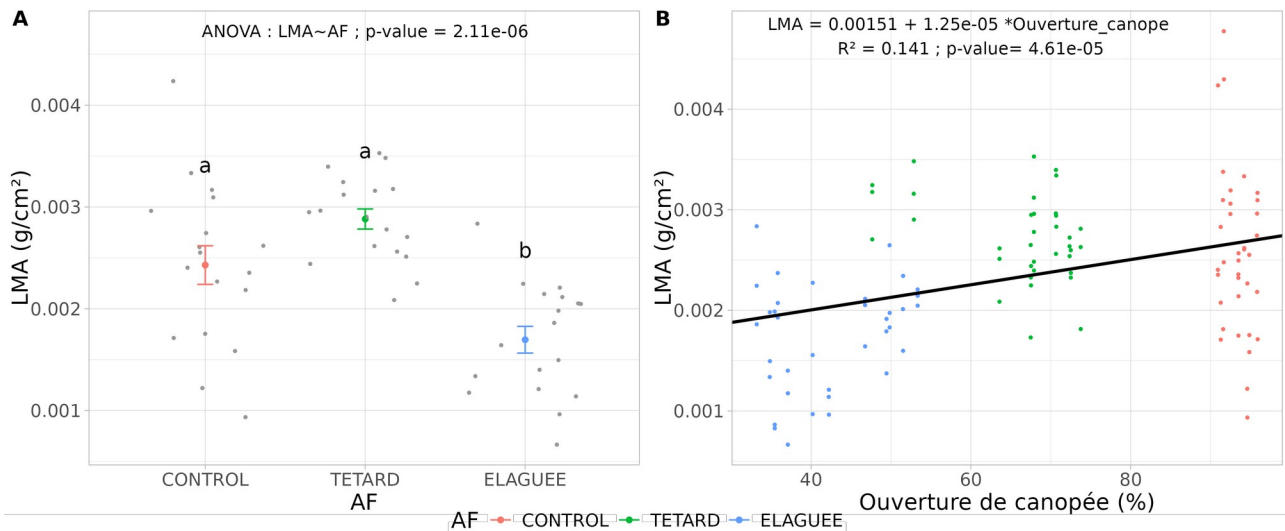


Figure 12: Terres de Roumassouze : A – Masse surfacique moyenne des feuilles (LMA) (g/cm²) en pleine irrigation en fonction de la modalité agroforestière. ANOVA, LMA ~ AF, p-value = 2,11 e-6, α = 5 %. Test post-hoc Tukey. Les lettres différentes représentent une différence significative de LMA entre les modalités. Barre d'erreur = erreur standard. B – Masse surfacique moyenne des feuilles (LMA) (g/cm²) en fonction de l'ouverture de canopée (%) et de la modalité agroforestière. Régression linéaire, LMA ~ Ouverture canopée, p-value = 4,61 e-5, α = 5 %. Le Control (C) est en rouge, le Têtard (T) en vert et l'Élaguée (L) en bleu.

5.1.2.2 Développement

Les pommes de terre en C ont des stades de développement plus avancés que les modalités T et L (Figure 13). Le 11 juin, le test de Kruskal-Wallis (stade phénologique ~ AF, p-value = 6.158 e-7) suivi d'un test de Dunn affirme que pour la pleine irrigation C et L sont significativement en avance sur T.

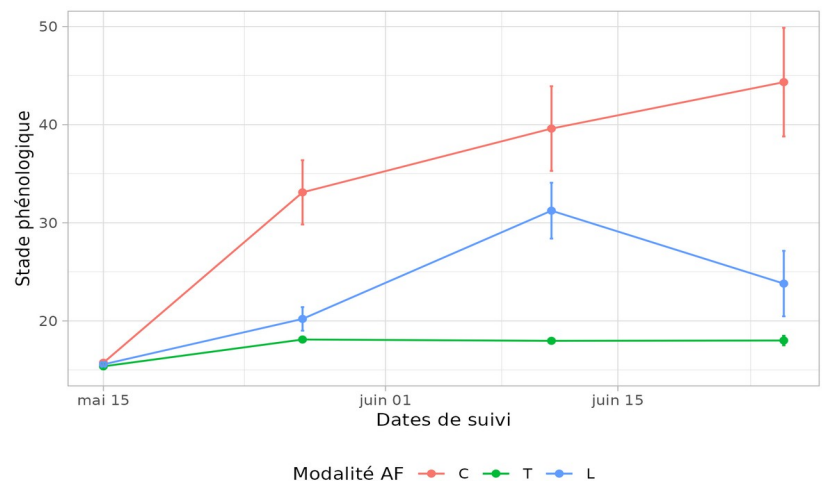


Figure 13: Terres de Roumassouze : Évolution des stades de développement des pommes de terre au cours de la saison de culture en pleine irrigation pour les modalités agroforestières (AF). Le Control (C) est en rouge, le Têtard (T) en vert et l'Élaguée (L) en bleu. Barre d'erreur = erreur standard.

5.1.2.3 Rendement

La production brute est significativement supérieure en C qu'en T et L et ne dépend pas des niveaux d'irrigation. Il y a une perte de production brute de 54 % en T et de 48 % en L par rapport au C (Tableau 13). Cependant la production nette, c'est-à-dire la production commercialisable, dépend à la fois des niveaux d'irrigation et de la modalité agroforestière (Figure 14A et B). La modalité Control a des moyennes significativement différentes entre la pleine irrigation (326.3 ± 26.6 g/plant) et la demi-irrigation (182.6 ± 22.1 g/plant), ce qui correspond à une réduction de 55 % du rendement commercialisable (Tableau 13). Pour finir, la production non commercialisable dépend principalement de la modalité agroforestière. Il y a significativement moins de perte en L qu'en T et C (Kruskal-Wallis, p-value = 1.558×10^{-12}). Le poids spécifique des tubercules est significativement différent entre les modalités agroforestières avec un poids spécifique supérieur en C puis en T ainsi qu'en L (Tableau 13).

Les nombres de tubercules brut et net dépendent principalement de la modalité agroforestière. C a un nombre de tubercules brut significativement supérieur à T et L. Par contre, T a un nombre net de tubercules significativement inférieur à C et L (Tableau 13).

Les différences entre production et nombre de tubercules brut et net sont explicables par les dégâts différentiels qu'il y a eu sur la récolte. En effet, les dégâts de morsure de rats taupiers sont plus présents en C (33 plants touchés) et en T (39 plants touchés) qu'en L (0 plant touché). De plus, la non-commercialisation de tubercules verts se retrouve principalement en C (22 plants touchés contre 2 en T et 1 en L) (Tableau 12). Ainsi le poids de la production non commercialisable en C ($134,1 \pm 20,1$ g/plant) et en T ($123,4 \pm 12,7$ g/plant) a été significativement supérieur à celui en L ($43,4 \pm 8,0$ g/plant) (Kruskal-Wallis, p-value = $3,41 \times 10^{-9}$).

L'efficacité d'utilisation de l'eau est significativement supérieure en Élaguée en demi-irrigation que dans toutes les autres modalités agroforestières et d'irrigation. Un passage de pleine à demi-irrigation a doublé l'efficacité d'utilisation de l'eau dans la modalité élaguée (Figure 14C).

Pour toutes les modalités agroforestières et d'irrigation confondues, la proportion de tubercules de petit calibre (inférieur à 35 mm) représente 40 % des tubercules produits. La modalité L a 40 % de sa production dans le calibre 35-45 mm. Dans toutes les modalités, il y a très peu de tubercules de calibre supérieur à 55 mm (Figure 14D).

Tableau 12: Terres de Roumassouze :
Nombre de plants ayant des dégâts
provoquant la non-commercialisation de
certains tubercules pour les modalités
agroforestières (AF) et d'irrigation (Irri).
Les principaux dégâts sont : petit pour un
diamètre inférieur à 35 mm, morsure par un
rat taupier, tubercule présentant des trous et
tubercules verts.

AF	Irri	Petit	Morsure	Trou	Vert
C	Demi	25	18	8	14
	Pleine	23	17	6	8
T	Demi	27	23	7	2
	Pleine	21	16	5	0
L	Demi	23	0	4	0
	Pleine	24	0	5	1

Tableau 13: Terres de Roumassouze : Récapitulatif des moyennes et des erreurs standard de la production brute et nette (g/plant), du nombre de tubercules brut et net par plant et du poids spécifique des tubercules commercialisables pour les modalités agroforestières (AF) et d'irrigation (Irri). Des tests de Kruskal-Wallis ont été effectués sous la forme : variable à expliquer ~ AF * Irrigation, les p-values sont précisées dans le tableau. Les lettres différentes (issues des tests de Dunn) représentent une différence significative entre les modalités.

AF	Irri	Production brute ± SE (g/plant)	Nombre de tubercule brut ± SE	Production nette ± SE (g/plant)	Nombre de tubercules net ± SE	Poids spécifique tubercule ± SE (g/tubercule)
C	Demi	380.5 ± 37.0 (a)	8.0 ± 0.6 (a)	182.6 ± 22.1 (ab)	2.7 ± 0.3 (ab)	65.2 ± 6.7 (ab)
	Pleine	460.5 ± 34.6 (a)	8.5 ± 0.7 (a)	326.3 ± 26.6 (c)	4.3 ± 0.5 (a)	82.1 ± 5.0 (a)
T	Demi	214.7 ± 19.9 (b)	5.5 ± 0.4 (b)	88.5 ± 17.2 (ad)	1.3 ± 0.3 (b)	39.8 ± 7.0 (bc)
	Pleine	209.2 ± 19.4 (b)	6.0 ± 0.6 (ab)	85.8 ± 20.3 (d)	1.5 ± 0.4 (b)	38.0 ± 6.1 (c)
L	Demi	224 ± 17.2 (b)	4.7 ± 0.3 (b)	190.9 ± 19.6 (b)	3.1 ± 0.3 (a)	62.7 ± 5.1 (abc)
	Pleine	235.3 ± 26.9 (b)	5.4 ± 0.6 (b)	191.9 ± 27.4 (ab)	3.2 ± 0.4 (a)	59.5 ± 3.8 (bc)
p-value		1.087 e-9	4.512 e-6	9.361 e-11	8.711 e-9	1.36 e-5

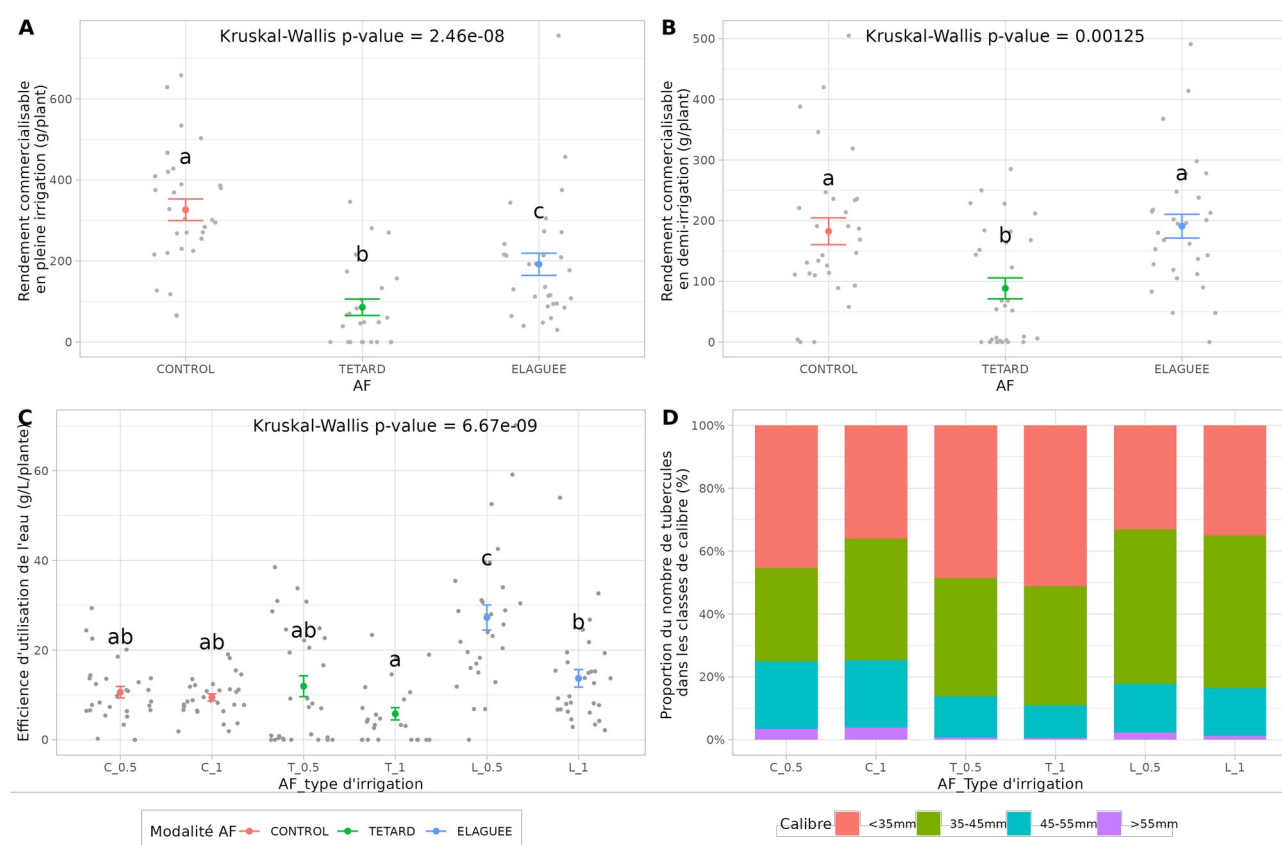


Figure 14: Terres de Roumassouze : A – Production commercialisable en pleine irrigation (g/plant) par modalité agroforestière (AF).

B – Production commercialisable en demi-irrigation (g/plant) par modalité agroforestière (AF). Kruskal-Wallis, rendement commercialisable ~ AF, $\alpha = 5\%$, test post-hoc Dunn.

C – Efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) (g/L/plante). Kruskal-Wallis, WUE ~ AF * Irrigation, $\alpha = 5\%$, Test post-hoc Dunn. Le Control (C) est en rouge, le Têtard (T) est en vert et l'Élaguée (L) est en bleu. Barre d'erreur = erreur standard.

D – Proportion du nombre de tubercules dans les classes de calibre (%) pour les modalités agroforestières et d'irrigation. Les tubercules de moins de 35 mm de calibre sont en rouge, ceux compris entre 35 et 45 mm sont en vert, ceux compris entre 45 et 55 mm sont en bleu et les tubercules de plus de 55 mm de calibre sont en violet. La demi-irrigation est représentée par 0.5 et la pleine irrigation est représentée par 1.

5.2 La ferme du Colibri

5.2.1 Caractérisation du microclimat

5.2.1.1 Rayonnement photosynthétiquement actif

La Figure 15 rend compte du PAR moyen sur la saison de culture. Le pic d'ensoleillement est atteint respectivement à 14 h, 15 h et 16 h pour R4, témoin et R1. La rangée 1 reçoit entre 25 et 55 % de rayonnement PAR en moins entre 9 h et 17 h par rapport au témoin. Une différence maximale de 60 % de rayonnement entre le rang 1 et le témoin a lieu à 13 h (Figure 15). Sur toute la saison de culture, R1 et R4 ont eu une réduction de PAR de 48,5 % et de 4,4 % respectivement par rapport au témoin (Tableau 14).

Tableau 14: Ferme du Colibri :
Cumul des rayonnements
photosynthétiquement actifs (PAR)
moyen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) en fonction des
distances à la haie.

Distance	Cumul de PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$)
R1	400962
R4	744126
Témoin	777753

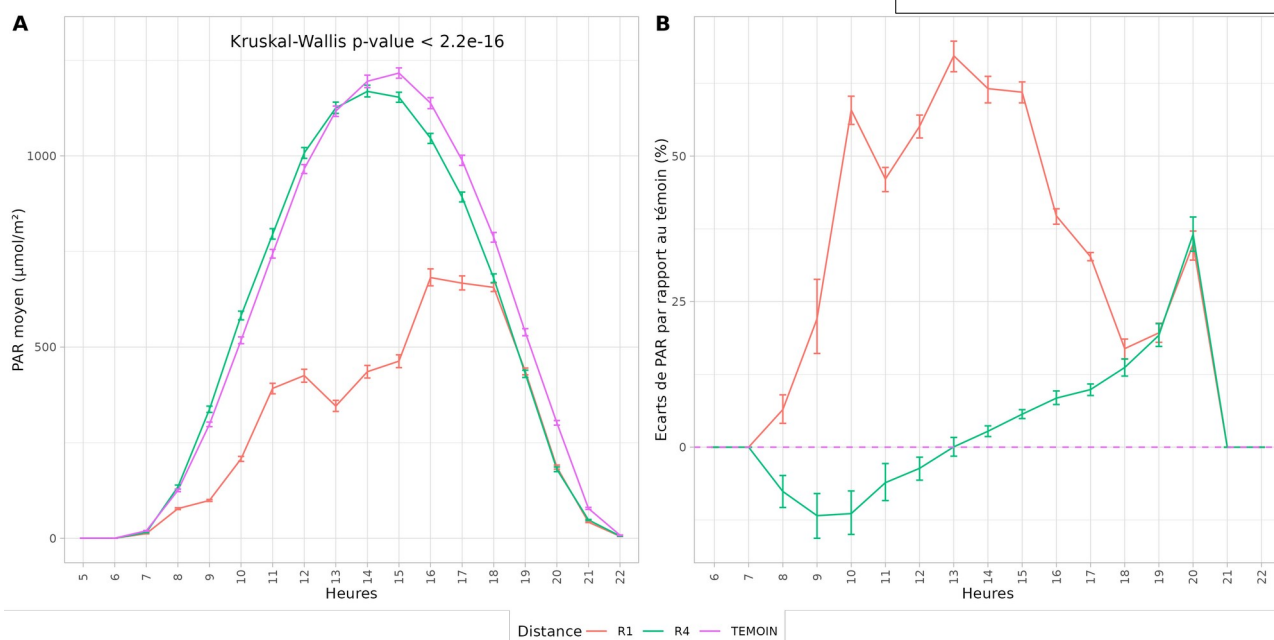


Figure 15: Ferme du Colibri : A – Rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) moyen par heure ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$).
Kruskal-Wallis, $\text{PAR} \sim \text{Distance}$, $p\text{-value} < 2.2 \times 10^{-16}$, $\alpha = 5\%$.

B – Écart de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) moyen (%) par heure par rapport au témoin. Le rang 1 (R1) est en rouge, le rang 4 (R4) en vert et le témoin en violet. La ligne en pointillé $y=0$ violette symbolise le témoin. Barre d'erreur = erreur standard.

5.2.1.2 Température et humidité relative

Les températures moyennes ainsi que l'amplitude de température journalière en juillet du rang 1 et du témoin sont significativement inférieures à celles dans le rang 4 (Tableau 15). Les températures journalières du Témoin et de R1 sont relativement proches même si R1 diffère de plus ou moins 1°C du Témoin. Les températures en R4 sont supérieures à celles du témoin de 8 h à 18 h allant jusqu'à 2°C d'écart à 13 h (Figure 16A). L'humidité relative moyenne journalière en juillet est significativement plus faible en Témoin suivie de R1 puis de R4 (Tableau 15). La nuit, l'humidité

relative est environ 3 % supérieure en R4 qu'en témoin et 1 % supérieure en R1 qu'en témoin (Figure 16B).

Tableau 15: Ferme du Colibri : Récapitulatif des températures moyennes (°C), des amplitudes de température moyenne (°C) et d'humidité relative moyenne (%) ± erreur standard pour les distances à la haie en juillet 2025. Les p-values des tests de Kruskal-Wallis et ANOVA (variable à expliquer ~ Distance, α = 5 %) sont présentées. Les lettres différentes des tests de Dunn et de Tukey représentent une différence significative entre les modalités.

Distance	Température moyenne ± SE (°C) (Dunn)	Amplitude de température moyenne ± SE (°C) (Tukey)	Humidité relative ± SE (%) (Dunn)
R1	23,95 ± 0,05 (a)	15,74 ± 0,67 (b)	61,05 ± 0,18 (a)
R4	24,53 ± 0,06 (b)	18,07 ± 0,84 (a)	61,74 ± 0,19 (b)
Témoin	24,07 ± 0,06 (a)	15,36 ± 0,81 (b)	60,28 ± 0,22 (c)
p-value	3.089 e-6	2,91 e-4	7,21 e-7

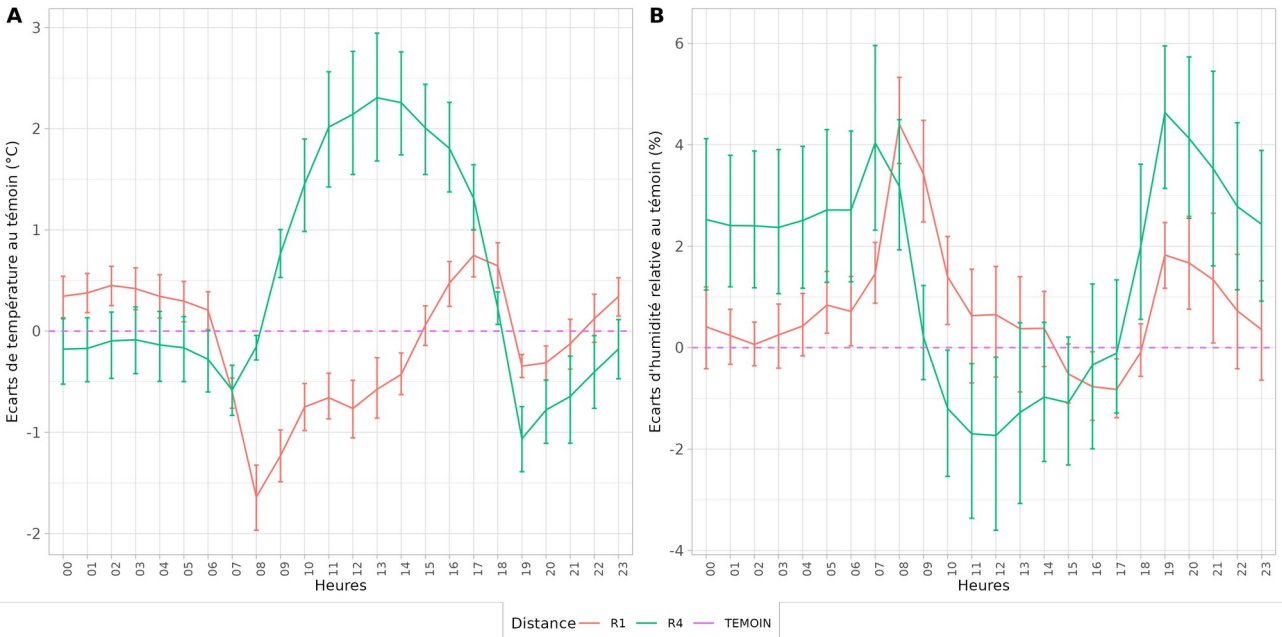


Figure 16: Ferme du Colibri : A – Ecart des températures moyennes horaires (°C) au témoin en juillet 2025. B – Ecart d'humidité relative moyenne horaire (%) au témoin en juillet 2025. Le rang 1 est en rouge, le rang 4 est en vert et le témoin est représenté par la ligne en y = 0 en pointillé violet. Barre d'erreur = erreur standard.

Beaucoup de tensiomètres ont disfonctionné pendant la saison de culture, ainsi la tension de l'eau dans le sol n'a pas été analysée.

5.2.2 Croissance, développement et performances agronomiques

5.2.2.1 Croissance et développement

La hauteur des pommes de terre le 17 juin dépend principalement de la distance à la haie. Les rangées 1, 2 et 5 ont des hauteurs moyennes significativement supérieures à celles des rangées 4 et témoin le 17 juin en pleine irrigation (Figure 17A). Les rangs 1 et témoin ont une vigueur significativement supérieure au rang 4 le 17 juin en pleine irrigation (Figure 17B). De plus, la masse surfacique des feuilles dépend principalement de la distance à la haie. Les rangs 4, 5 et témoin ont des masses surfaciques des feuilles significativement supérieures aux rangs 1 et 2 (Figure 18A). De plus, une corrélation positive existe entre la masse surfacique et l'ouverture de canopée avec un coefficient de corrélation de 0,323 (Figure 18B). Pour finir, le 20 mai 2025 en pleine irrigation, le témoin a un retard significatif de développement par rapport au rang 5 (Figure 19).

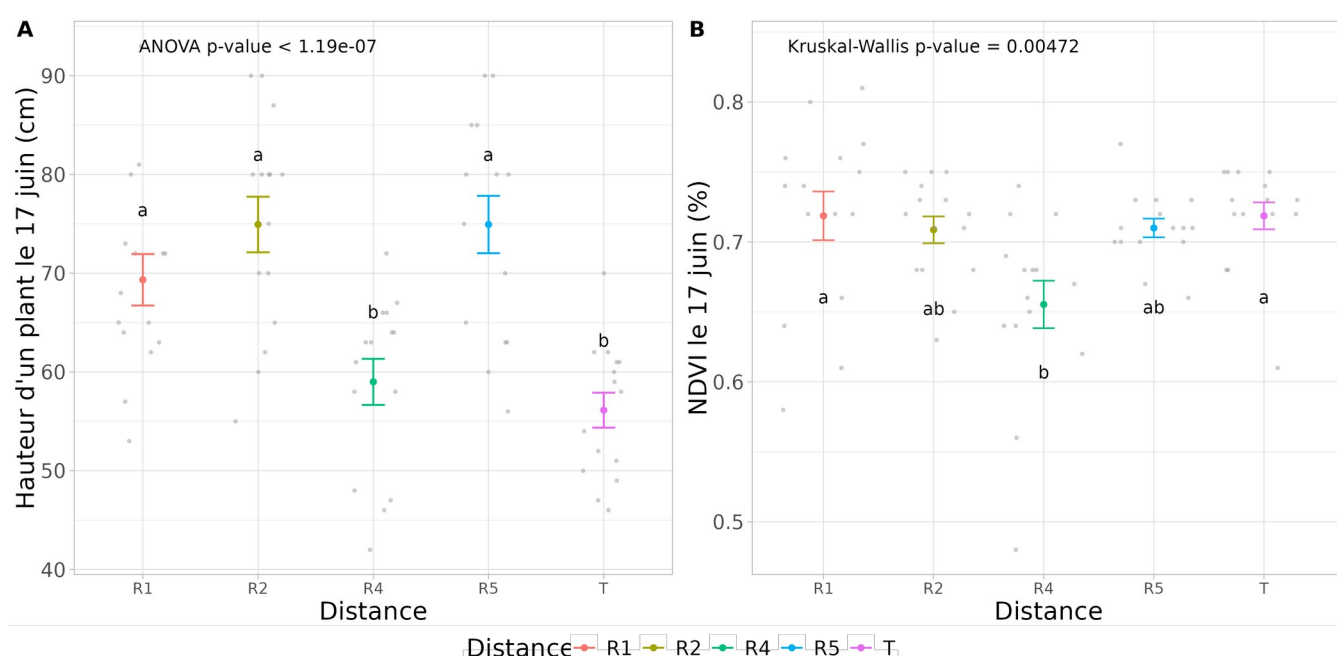


Figure 17: Ferme du Colibri : A – Hauteur d'un plant de pomme de terre (cm) le 17 juin 2025 en pleine irrigation en fonction de la distance à la haie. ANOVA, Hauteur ~ Distance, p -value $< 1,19 \times 10^{-7}$, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Tukey.

B – Indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (%) le 17 juin 2025 en pleine irrigation en fonction de la distances à la haie. Kruskal-Wallis, Hauteur ~ Distance, p -value = 0,00472, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Dunn. Le rang 1 (R1) est en rouge, le rang (R2) en jaune, le rang 4 (R4) en vert, le rang 5 (R5) en bleu et le témoin (T) en violet. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les rangs. Barre d'erreur = erreur standard.

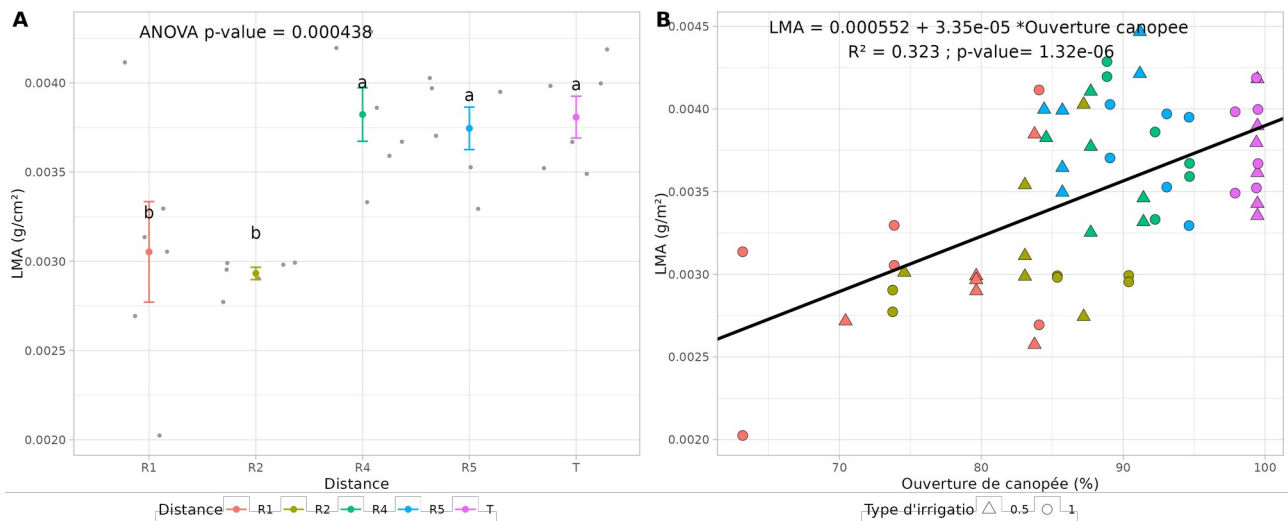


Figure 18: Ferme du Colibri : A – Masse surfacique des feuilles (LMA) (g/cm²) en pleine irrigation en fonction de la distance à la haie. ANOVA, LMA~Distance, p-value = 0,000438, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Tukey. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités. Barre d'erreur = erreur standard.

B – Masse surfacique des feuilles (LMA) (g/cm²) en fonction de l'ouverture de canopée (%) et du type d'irrigation. Régression linéaire, LMA~Ouverture canopée. p-value = 1,32 e-6, $\alpha = 5\%$. Les triangles symbolisent la demi-irrigation, et les ronds la pleine irrigation. Le rang 1 (R1) est en rouge, le rang 2 (R2) en jaune, le rang 4 (R4) en vert, le rang 5 (R5) en bleu et le témoin (T) en violet.

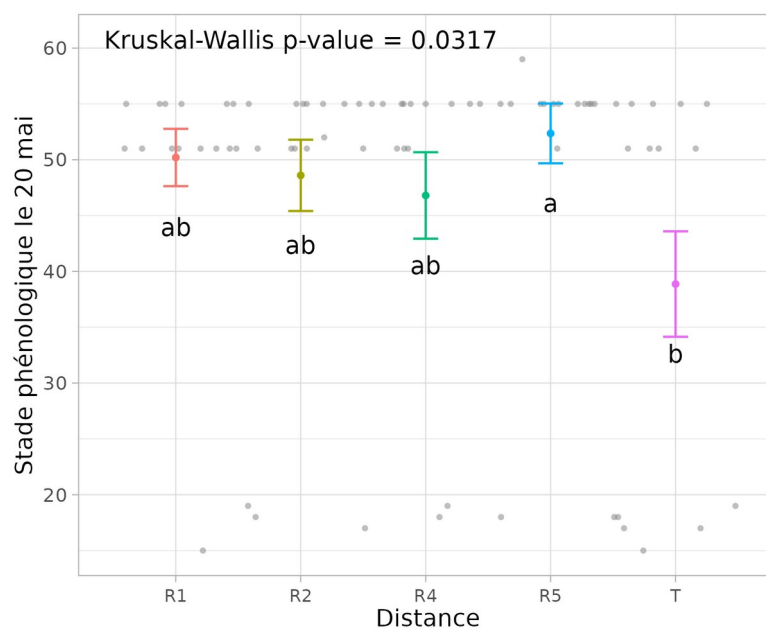


Figure 19: Ferme du Colibri : Stade phénologique des pommes de terre le 20 mai 2025 en pleine irrigation en fonction de la distance à la haie. Kruskal-Wallis, Phénologie ~ Distance, p-value = 0,0317, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Dunn. Les lettres différentes représentent une différence significative de stade de développement. Barre d'erreur = erreur standard.

5.2.2.2 Rendement

La production brute varie en fonction de la distance à la haie et du type d'irrigation. Un rendement brut moyen maximal a été atteint sur le rang 5 en demi-irrigation (729.2 ± 64.1 g/plant). Le rendement brut moyen minimal a été atteint en témoin en pleine irrigation (466.5 ± 28.5 g/plant) (Tableau 16). En pleine irrigation, le rendement commercialisable moyen sur R4 et R5 est significativement supérieur à celui sur le Témoin (Figure 20A). En demi-irrigation, le rendement commercialisable moyen sur R5 est significativement supérieur à ceux sur R1, R4, et le témoin (Figure 20B). Au sein de chaque rang, il n'y a aucune différence significative entre la pleine irrigation et la demi-irrigation (Tableau 16). De plus, sur toutes les distances et types d'irrigation, les pertes de rendement sont de l'ordre de 10,1 g/plant, ce qui équivaut à 1,3 % de la production brute. Les pertes de rendement sont principalement dues aux défauts du cœur creux. Le nombre de tubercules à la fois brut et net ne dépend ni de la distance à la haie ni de la modalité d'irrigation (Tableau 16).

Tableau 16: Ferme du Colibri : Récapitulatif des moyennes et des erreurs standard de la production brute et nette (g/plant), du nombre de tubercules bruts et nets par plant et du poids spécifique des tubercules commercialisables pour les différentes distances à la haie et le type d'irrigation. Les tests, les p-values ainsi que les modèles linéaires retenus sont précisés. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités.

Dist	Irri	Production brute $\pm$ SE (g/plant) (Tukey)	Nombre de tubercule brut $\pm$ SE	Production nette $\pm$ SE (g/plant) (Tukey)	Nombre de tubercules net $\pm$ SE	Poids spécifique tubercule $\pm$ SE (g) (Dunn)
R1	Demi	596.0 ± 36.8 (bc)	7.9 ± 0.6	594.9 ± 36.3 (abc)	7.7 ± 0.6	81.3 ± 5.0 (ab)
	Pleine	514.6 ± 62.3 (bc)	6.3 ± 0.7	505.9 ± 59.9 (bc)	6.2 ± 0.7	91.4 ± 9.9 (ab)
R2	Demi	730.7 ± 50.9 (ab)	8.7 ± 0.6	726.6 ± 48.2 (ab)	8.6 ± 0.6	86.2 ± 4.1 (ab)
	Pleine	661.3 ± 61.0 (abc)	7.7 ± 0.6	655.1 ± 61.3 (abc)	7.5 ± 0.7	91.5 ± 8.7 (ab)
R4	Demi	635.3 ± 48.9 (abc)	7.7 ± 0.7	595.3 ± 56.2 (abc)	7.7 ± 0.7	81.9 ± 8.2 (ab)
	Pleine	718.5 ± 77.8 (ab)	8.0 ± 0.7	704.8 ± 76.5 (abc)	7.7 ± 0.7	97.1 ± 10.3 (ab)
R5	Demi	851.7 ± 64.5 (a)	7.9 ± 0.7	829.7 ± 62.6 (a)	7.7 ± 0.7	119.7 ± 14.7 (a)
	Pleine	729.2 ± 64.1 (ab)	7.5 ± 0.8	729.2 ± 64.2 (ab)	7.5 ± 0.8	103.0 ± 8.3 (ab)
T	Demi	630.1 ± 34.1 (abc)	6.5 ± 0.6	627.8 ± 34.8 (abc)	6.5 ± 0.7	111.5 ± 11.8 (ab)
	Pleine	466.5 ± 28.5 (c)	7.0 ± 0.5	464.1 ± 28.7 (c)	6.7 ± 0.4	72.4 ± 5.0 (b)
Test statistique et p-value		ANOVA p-value = 2.66 e-5	Aucune différence significative	ANOVA p-value = 1.34 e-4	Aucune différence significative	Kruskal-Wallis p-value = 0.0311
Modèle linéaire retenu		Prod.brut ~ Distance*Irrigation	-	Prod.nette ~ Distance*Irrigation	-	Poids.spécifique ~ Distance*Irrigation

En comparant au sein de chaque distance les différents types d'irrigation, les rangs 1, 2, 5 et témoin ont une efficacité d'utilisation de l'eau significativement supérieure en demi-irrigation qu'en pleine irrigation. L'efficacité d'utilisation de l'eau en agroforesterie est en moyenne 2 fois supérieure en demi-irrigation qu'en pleine irrigation (Figure 20C).

Pour toutes les distances et types d'irrigation confondus, le nombre de tubercules de petits calibres (inférieur à 35 mm) varie entre 15 et 20 %. Pour les deux types d'irrigation, les rangs 1, 2 et 4 ont autour de 30 % de tubercules de gros calibre (supérieur à 55mm), alors que le rang 5 et le témoin

ont entre 45 % et 50 % de tubercules de gros calibre pour une demi-irrigation, et entre 23 % et 33 % de tubercules de gros calibre pour une pleine irrigation (Figure 20D).

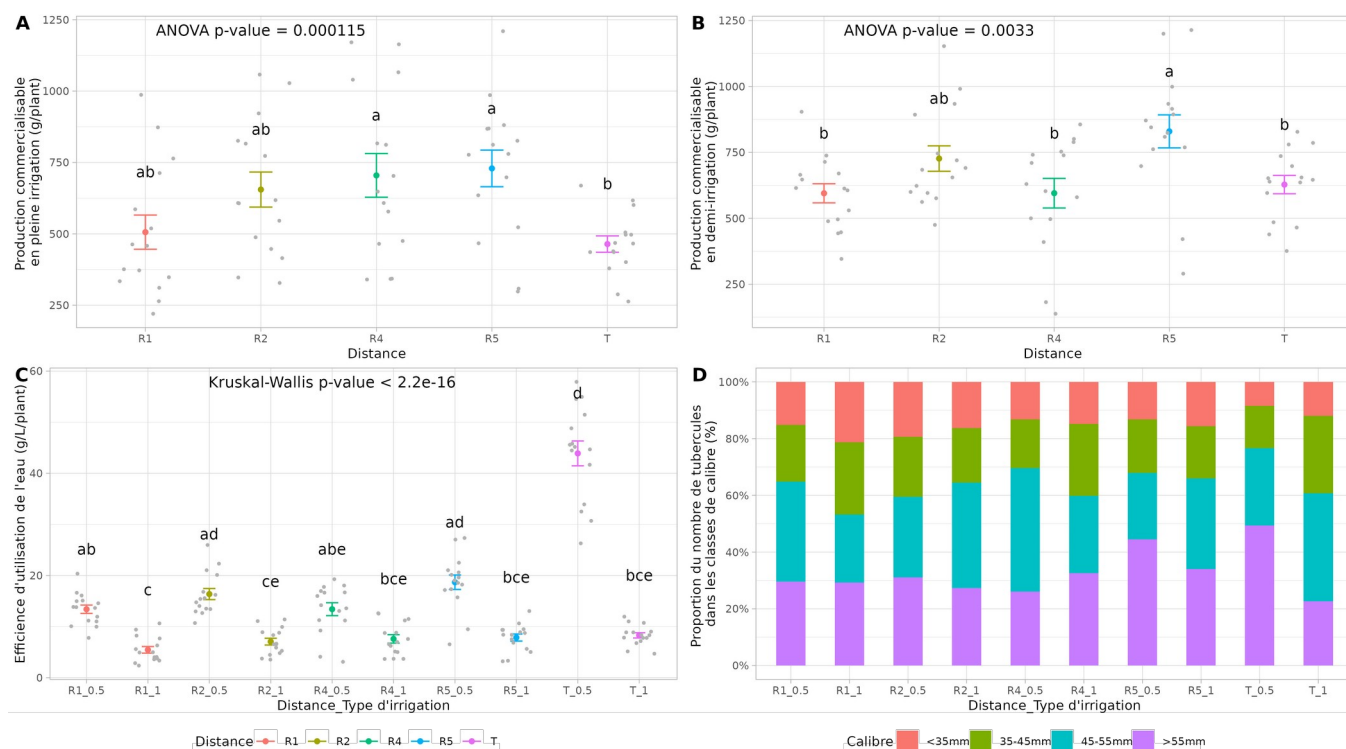


Figure 20: Ferme du Colibri : A – Production commercialisable (g/plant) en pleine irrigation en fonction de la distance à la haie.

B – Production commercialisable (g/plant) en demi-irrigation en fonction de la distance à la haie.

ANOVA, Rendement commercialisable ~ Distance, $\alpha = 5\%$. Test post-hoc de Tukey.

C – Efficacité d'utilisation de l'eau (g/L/plant) pour les distances à la haie et le type d'irrigation. Kruskal-Wallis, $WUE \sim Distance * Irrigation$, p-value < 2,2 e-16, $\alpha = 5\%$. Les lettres différentes représentent une différence significative entre les modalités. Barre d'erreur = erreur standard. Le rang 1 (R1) est en rouge, le rang 2 (R2) en jaune, le rang 4 (R4) en vert, le rang 5 (R5) en bleu et le témoin (T) en violet.

D – Proportion du nombre de tubercules dans les 4 classes de calibre en fonction de la distance à la haie et du type d'irrigation. Les tubercules de moins de 35 mm de calibre sont en rouge, ceux compris entre 35 et 45 mm sont en vert, ceux compris entre 45 et 55 mm sont en bleu et les tubercules de plus de 55 mm de calibre sont en violet. La demi-irrigation est représentée par 0.5 et la pleine irrigation est représentée par 1.

6 Discussion

L'objectif de cette étude était d'évaluer dans quelle mesure l'agroforesterie impacte les performances agronomiques de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) sous deux régimes d'irrigation en climat méditerranéen. Deux sites expérimentaux, les Terres de Roumassouze et la Ferme du Colibri, ont été étudiés.

6.1 Effet des arbres sur le microclimat

6.1.1 Rayonnement

La caractérisation microclimatique des sites expérimentaux a permis en premier lieu de quantifier une réduction du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) reçu dans les modalités agroforestières par rapport aux témoins plein soleil. Sur les Terres de Roumassouze, le Têtard a reçu 57 % de PAR, et le L 39 % de PAR par rapport au témoin plein soleil. Les études précédentes sur ce site expérimental ont des réductions de rayonnement perçu par les cultures proches de ces résultats (Broyer, 2023; Verstraete, 2024). D'un autre côté, sur la ferme du Colibri, le rang 1 a reçu 51 % de PAR et le rang 4 95 % de PAR par rapport au témoin plein soleil. Cette diminution de PAR perçu est directement liée à l'ouverture de canopée et ainsi à la gestion de la canopée et à la distance aux arbres (Martin-Chave et al., 2019).

6.1.2 Température et hygrométrie

Même si les différences de température et d'hygrométrie moyenne entre les modalités sont faibles au global, au pas de temps journalier, il semble y avoir un effet tampon des températures et de l'humidité dans les modalités agroforestières par rapport au témoin plein soleil. Cet effet est plus net sur les Terres de Roumassouze où la température de l'air en agroforesterie est plus élevée de 1°C la nuit et inférieure jusqu'à 2,5°C en journée. La différence de température au témoin semble être liée à la dynamique de rayonnement. En effet, plus l'ouverture de canopée diminue, plus l'amplitude de température diminue. Les tendances observées sur ce site expérimental d'effet tampon via la température et l'hygrométrie sont en adéquation avec plusieurs références scientifiques (Gosme et al., 2016; Jacobs et al., 2022; Quinkenstein et al., 2009; Ramananjatovo et al., 2021).

Sur la Ferme du Colibri, l'effet tampon via les températures et l'hygrométrie en agroforesterie est moins évident, car l'écart au témoin est moins prononcé, notamment sur le rang 1. Le rang 4 a quant à lui une température plus élevée que le témoin en journée, allant jusqu'à +2°C, et une hygrométrie supérieure de 3 % à celle du témoin la nuit. Ces deux différences quant à la température et à l'hygrométrie sont sûrement dues au fait que la vitesse moyenne du vent est réduite (résultat non présenté) grâce aux haies brise-vent, ce qui empêche le brassage de l'air par le vent (Brandle et al., 2004; Quinkenstein et al., 2009).

Le protocole mis en place dans cette étude permet bien de caractériser des modifications microclimatiques provoquées par la présence d'arbres et par leur modalité de taille. Les hypothèses de départ étaient que la présence d'arbres sur la parcelle modifie le microclimat par la réduction des rayonnements, et un effet tampon sur la température et l'humidité relative de l'air. Cette hypothèse

est vérifiée sur les Terres de Roumassouze, cependant l'effet tampon est moins marqué sur la Ferme du Colibri de par la présence de haies brise-vent.

6.1.3 Tension hydrique dans le sol

Sur les Terres de Roumassouze, l'eau apportée en pleine irrigation sur les modalités L et T est similaire à 100 L d'eau près (1787 L pour têtard et 1679 L pour élaguée). Cependant la tension hydrique en L est significativement plus élevée qu'en T. Cette différence pourrait être expliquée par l'approvisionnement en eau des arbres qui dépend notamment de la taille qu'ils ont subie. Il a été montré qu'une canopée sévèrement taillée diminue les besoins en eau des arbres (Jackson et al., 2000).

À la fois pour le témoin et en T, l'eau du sol est significativement moins disponible en demi-irrigation qu'en pleine irrigation, ce qui correspond à un résultat attendu. Cependant, en L, l'eau du sol est plus disponible en demi-irrigation qu'en pleine irrigation, ce qui est surprenant. Il est possible que les différences entre les modalités soient dues à la variabilité de la tension hydrique au sein d'une même texture de sol car la tension de l'eau dans le sol varie en fonction des 3 dimensions de l'espace et du temps (Cichota et al., 2006; Shock & Wang, 2011). De plus, pour caractériser l'état hydrique du sol en fonction des modalités agroforestières et d'irrigation, il serait possible d'augmenter le nombre de couples de sondes installés dans chaque interaction de modalité. Un couple de sondes correspondant à une sonde située à 20 cm et une autre à 40 cm de profondeur. L'installation plus conséquente de tensiomètres pourrait permettre de diminuer la variabilité de la mesure, mais cela représente beaucoup de matériel et de temps d'installation. Sur la Ferme du Colibri, cette installation pourrait se faire sur les rangs 1, 4 et témoin.

Sur les deux sites expérimentaux, certaines sondes ont été exclues de l'analyse, car elles n'ont pas collecté de données ou ont collecté des valeurs aberrantes comme des 0 ou des données supérieures à 250 kPa pendant toute la saison de culture (1 sonde dans chaque modalité agroforestière à Roumassouze). C'est également pour cette raison que l'analyse des tensions hydriques du sol sur la Ferme du Colibri n'a pas été effectuée. Il est possible que les valeurs aberrantes soient causées par une méthode d'installation différente entre les sondes. En effet, certaines sondes ont été installées avec une barre à mine qui tasse le sol et qui pourrait créer des zones empêchant la continuité de la solution sol entre celui-ci et la sonde. D'autres sondes ont été installées à l'aide d'une tarière, ce qui est la méthode d'installation préconisée.

6.2 Performances agronomiques

6.2.1 Croissance et développement en pleine irrigation

Uniquement les résultats présentés de l'effet du microclimat agroforestier sur la pleine irrigation sur les deux sites expérimentaux sont discutés ici. Sur la Ferme du Colibri, le 17 juin, la hauteur des plants était quant à elle significativement supérieure sur les rangs 1, 2 et 5 par rapport au rang 4 et témoin. L'ombrage a pu avoir un effet sur l'étiollement des deux premiers rangs car le PAR sur le rang 1 est égal à 51 % du PAR reçu en témoin. Les résultats sur ce site expérimental sont en accord avec les études précédentes qui ont remarqué un allongement des tiges en condition d'ombrage artificiel (Abdrabbo et al., 2013; Demagante & Vander Zaag, 1988; Mariana & Hamdani, 2016) ou

agroforestière (Broyer, 2023; Gill et al., 2015; Sun & Dickinson, 1997; Verstraete, 2024). La hauteur de plant élevée pour le rang 5 sur la Ferme du Colibri, peut être expliquée par une plus forte pression des adventices (sorgho d'Alep pouvant atteindre 2 m de hauteur) sur ce rang comparé aux autres.

Sur les deux sites expérimentaux, il a été montré qu'il existe une corrélation positive entre la masse surfacique des feuilles et l'ouverture de canopée. Cela fait référence à une stratégie des plantes qui vise à exploiter au mieux la chlorophylle en conditions d'ombrage (Mariana & Hamdani, 2016; Poorter et al., 2009).

Les deux sites expérimentaux montrent un effet différent de l'ombrage sur la durée du cycle de développement. Sur les terres de Roumassouze, le développement des plantes était plus avancé en témoin qu'en élaguée, ce qui est en accord avec les études précédentes sur ce site (Broyer, 2023; Verstraete, 2024). À titre d'exemple, l'étude de Schulz et al. (2019) a montré un retard de 3 jours de la floraison sous 50 % d'ombrage. Sur la Ferme du Colibri, il a été observé visuellement une différence d'avancement entre les stades de floraison entre les rangs en agroforesterie. Cependant, le 20 mai, le témoin a un développement moins avancé que le rang 5. Cela pourrait être provoqué par le fait que les pommes de terre en témoin ont été plantées deux semaines après les pommes de terre agroforestières. De plus, les rangs au centre de la planche de culture sont soumis à une température de l'air plus élevée en journée comparé au témoin. En effet, il a été montré que l'augmentation de température jusqu'à 28°C améliore généralement la production florale dans des conditions d'éclairage naturel (Almekinders & Struik, 1996).

Les plants en têtard sur les Terres de Roumassouze ont un comportement étonnant comparé aux autres modalités, car un comportement entre celui de l'élaguée et du témoin était attendu. Les faibles valeurs de hauteur et de vigueur en T peuvent être expliquées par le fait que la levée y a été moins homogène qu'en témoin ou qu'en élagué. Cela pourrait être expliqué par la présence précoce de rats taupiers dans cette modalité par rapport aux autres. En effet, les premiers monticules de rats taupiers ont été relevés en têtard en début de printemps. La pression différentielle de rats taupiers entre les modalités est difficilement explicable, car les modalités agroforestières ont été gérées de la même manière quant au paillage, à la fertilisation, et à la plantation. De plus, il est possible qu'en début de saison la gestion de l'irrigation en têtard n'était pas optimale pour cause de faible débit dans le réseau d'irrigation. La modalité têtard n'a probablement pas atteint le stade de floraison avant la période de sénescence à cause de ce retard de croissance et de vigueur au cours de la saison.

Le protocole appliqué permet de répondre au questionnement sur la caractérisation des réponses écophysologiques de la pomme de terre irriguée pleinement aux modifications microclimatiques induites par les arbres. L'hypothèse selon laquelle les modifications du microclimat proche des arbres induisent un retard de développement de la pomme de terre et modifient ses paramètres de croissance est validée partiellement sur les deux sites expérimentaux. Uniquement la comparaison des modalités témoin et élaguée vérifie l'hypothèse d'un étiolement et d'un retard de développement des pommes de terre sur les Terres de Roumassouze. Seulement l'hypothèse de l'étiolement des plants sous ombrage est vérifiée sur la Ferme du Colibri.

6.2.2 Rendement sous deux régimes d'irrigation

L'effet de l'agroforesterie en pleine irrigation :

Sur les Terres de Roumassouze, les résultats ont montré qu'il y avait une réduction d'environ 50 % du rendement commercialisable, et ce quel que soit le mode de gestion des arbres (têtard ou élagué). Ces pertes de rendement sont similaires à celles observées en 2024 sur ce même site expérimental (diminution de 40 % en T et 48 % en L) (Verstraete, 2024) ainsi que dans d'autres études (Alam et al., 2015; Pardon et al., 2018). Cette réduction de rendement peut être expliquée à la fois par une diminution du nombre de tubercules (30 % pour T et 37 % pour L), et une diminution du poids des tubercules (54 % pour T et 28 % pour L) en modalité d'ombrage. L'écart en nombre de tubercules pourrait provenir d'une réduction du nombre de stolons observés sous ombrage (O'Brien et al., 1998; Wurr et al., 1997).

La modalité élaguée a un rendement commercialisable supérieur à la modalité Têtard qui ne peut pas être expliqué par le poids spécifique de tubercules. Le faible rendement en T est probablement lié au fait que ses variables de croissance et de développement étaient mauvaises durant tout le cycle de culture, ce à quoi s'ajoute l'énorme impact qu'ont eu les rats taupiers sur les tubercules non commercialisables. Pendant la récolte, des galeries de rats taupiers sous le paillage ont été observées dans toutes les modalités de microclimat, cependant les plus grands dégâts sur les tubercules ont eu lieu en têtard.

Sur la Ferme du Colibri, en pleine irrigation, les rendements commercialisables moyens sur R4 et R5 sont significativement supérieurs à celui sur le témoin. Le témoin a possiblement subi une compétition avec des adventices telles que le liseron et le sorgho d'Alep au moins en fin de saison au moment du remplissage des tubercules. En effet, la compétition avec les adventices peut provoquer une diminution de 65 % du rendement commercialisable en diminuant le nombre et la taille des tubercules commercialisables (Siddiqui et al., 2024), ce qui est le cas dans la Ferme du Colibri. De plus, la comparaison entre le témoin et les rangs agroforestiers en pleine irrigation n'est pas pertinente car le témoin a été irrigué avec 60 % de la quantité d'eau reçue en agroforesterie.

Sur la Ferme du Colibri, même si la différence n'est pas significative, on peut remarquer une diminution de 30 % du rendement entre R5 et R1, ce qui est en accord avec des études précédentes (Gill et al., 2015; Pardon et al., 2018). Cette réduction de rendement peut également être due à une légère diminution du nombre de tubercules par plante et du poids spécifique des tubercules.

L'hypothèse selon laquelle la présence d'arbres en intraparcellaire a un effet positif sur les rendements en tubercules de la pomme de terre n'est pas vérifiée sur les deux sites expérimentaux.

Effet de la demi-irrigation en agroforesterie :

Sur les Terres de Roumassouze, en témoin, le passage d'une pleine à une demi-irrigation a créé une réduction significative de rendement commercialisable de 44 %. Ainsi, la demi-irrigation a possiblement provoqué un stress hydrique sur les pommes de terre. Ce résultat est en accord avec certaines études qui avaient conclu qu'une diminution de 13 % à 65 % de rendement peut survenir s'il y a un déficit hydrique au cours de la saison de culture (Alva et al., 2012; Karafyllidis et al., 1996; Patel & Rajput, 2007; Rolbiecki et al., 2015). L'efficacité d'utilisation de l'eau irriguée a doublé en L en demi-irrigation par rapport à la pleine irrigation. D'autres études ont pu montrer que

l'efficience d'utilisation de l'eau est augmentée en conditions avec moins d'irrigation qu'en condition de pleine irrigation. (Niu et al., 2024; Onder et al., 2005). À titre d'exemple, pour une irrigation à 66 % des besoins en eau des pommes de terre, l'efficience d'utilisation de l'eau d'irrigation a été multipliée par 1,8 en Turquie (Onder et al., 2005). Ainsi, dans une démarche d'économie de ressource en eau, en 2025, il a été intéressant de cultiver la pomme de terre avec une faible irrigation sous des arbres élagués.

Sur la Ferme du Colibri, il n'y a pas eu de perte significative de rendement entre la pleine et la demi-irrigation. Il y a même une amélioration de rendement non significative d'un passage de pleine irrigation à demi-irrigation sur la plupart des rangs. Cela est en contradiction avec les études précédentes qui affirment que le rendement augmente quand l'irrigation augmente (Alva et al., 2012; Djaman et al., 2021; Karafyllidis et al., 1996). En R5 et témoin, cela pourrait être lié au poids spécifique qui est augmenté en condition de demi-irrigation. Ce résultat est étonnant car un stress hydrique a plutôt tendance à diminuer le poids spécifique des tubercules commercialisables (Djaman et al., 2021; Yuan et al., 2003). Il est possible que la diminution de l'irrigation n'ait pas été assez forte pour provoquer une perte de rendement significative comme dans l'étude suivante (Camargo et al., 2015) où il a été trouvé un rendement similaire entre 80 %, 100 % et 120 % de l'irrigation nécessaire à la croissance des pommes de terre. Les rangs 1, 2, 5 et témoin ont une efficience d'utilisation de l'eau significativement supérieure en demi-irrigation qu'en pleine irrigation, ce qui est en accord avec des études précédentes (Niu et al., 2024; Onder et al., 2005). Il a donc été intéressant, dans un souci d'économie d'eau, de cultiver les pommes de terre en les irriguant moins.

Le protocole mis en place a permis de répondre à la dernière sous-question de recherche : quelles sont les réponses de la pomme de terre moins irriguée aux modifications du microclimat, notamment concernant son rendement ? L'hypothèse émise en début d'étude est que le microclimat agroforestier favorise le rendement des pommes de terre moins irriguées par rapport à des conditions de plein soleil moins irriguées. Cette hypothèse est valide uniquement sur la Ferme du Colibri en comparant la rangée 5 et le témoin en demi-irrigation. Cependant, l'efficience d'utilisation de l'eau est supérieure en demi-irrigation comparée à la pleine irrigation sur les deux sites expérimentaux. Ainsi, dans un contexte de changement climatique où la ressource en eau tend à se raréfier, l'agroforesterie pourrait être une solution pour utiliser plus efficacement cette ressource pour la production de pommes de terre.

6.3 Discussion des méthodes employées

Ce travail est la première étude qui tente de comprendre l'effet d'une baisse de l'irrigation en agroforesterie mature dans un contexte méditerranéen. La question de recherche a porté sur deux types de régimes d'irrigation, car il a été difficile de créer et de quantifier un stress hydrique sur les parcelles. Sur les Terres de Roumassouze, les parcelles ont été cultivées pour la première fois par Agroof, ce qui peut expliquer la difficulté de la gestion de l'irrigation de par l'appréhension du système d'irrigation existant. Le système d'irrigation actuel sur les Terres de Roumassouze présente des problèmes de débit pour la modalité Têtard, car il est situé en bout de rampe d'irrigation. Il se pourrait que les plants de pomme de terre en demi-irrigation aient reçu moins d'eau qu'estimé dans

ce document. Des propositions d'amélioration du protocole sont faites pour les Terres de Roumassouze, car le site est sous la responsabilité d'Agrooof.

Irriguer différemment les modalités agroforestières a permis de subvenir aux besoins différentiels des cultures. En effet, le rayonnement, la température de l'air et l'humidité sont différents entre les modalités agroforestières, ce qui provoque une évapotranspiration différente entre les modalités agroforestières. Cette stratégie peut être conservée pour les études suivantes sur le déficit hydrique.

Améliorer la gestion de l'irrigation pour créer un stress hydrique :

Gestion de l'irrigation par l'utilisation de tensiomètres :

En ayant des tensiomètres connectés, il est possible de définir une fourchette de valeur seuil pour l'irrigation de la culture. L'étude de Shock & Wang (2011) propose des valeurs seuil de tension hydrique pour différentes textures de sol. Il semblerait que pour une irrigation au goutte-à-goutte, il faille irriguer à partir du moment où la tension hydrique du sol dépasse 25-30 kPa (Shock & Wang, 2011). Pour créer une irrigation déficitaire, il serait possible de fixer le seuil à 60 kPa et d'irriguer jusqu'à 55 kPa quand ce seuil est dépassé. Il serait également nécessaire d'installer plus de tensiomètres par modalité et par type d'irrigation afin d'avoir des moyennes de tension de l'eau dans le sol plus robustes.

Gestion par le calcul de l'évapotranspiration potentielle :

Certaines études calculent des régimes d'irrigation par rapport à une pleine irrigation estimée à partir du calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) (Alva et al., 2012; Liu et al., 2006; Patel & Rajput, 2007) ou réelle (Badr et al., 2012; Foti et al., 1995; Rolbiecki et al., 2015). La plupart du temps, l'évapotranspiration est calculée grâce à l'équation de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) à partir des données météorologiques récoltées la veille via une station météorologique. L'irrigation complète est ainsi définie comme la différence entre la pluviométrie et l'évapotranspiration de la veille. L'évapotranspiration réelle est calculée à partir de l'ETP en le multipliant par le coefficient de culture (Kc) qui dépend du stade de développement de la culture. Ainsi, l'irrigation déficitaire peut être définie comme un pourcentage d'eau apportée par l'irrigation complète (par exemple 50%). Cette méthode demande l'acquisition journalière de la vitesse du vent, du rayonnement global, de la température moyenne, de l'humidité relative, et de la pluviométrie par type de microclimat. Une amélioration du système actuel sur la consultation à distance des données des sondes serait préférable pour rendre efficace le calcul de l'ETP. Cette stratégie se base sur une irrigation journalière, ce qui peut être contraignant.

Les propositions de gestion de l'irrigation pour créer une irrigation déficitaire impliquent toutes d'avoir une irrigation de précision. Pour cela, il serait possible d'automatiser le système d'irrigation à l'aide d'électrovannes dont la décision d'ouverture et de fermeture serait liée à un programmeur lui-même relié soit au résultat des tensiomètres soit à la différence de l'ETP et de la pluviométrie. Cet investissement permettrait de passer moins de temps sur la gestion de l'irrigation et de se consacrer pleinement au suivi et à la gestion des cultures.

Les jardins sont organisés avec 5 rangs comprenant des espèces différentes. Cette complexité devra être prise en compte dans la programmation des électrovannes. Ainsi, pour imposer une irrigation déficitaire, l'un des leviers est de mettre moins de gaines de goutte-à-goutte sur le rang voulu que

dans les autres rangs. L'autre levier serait d'imposer une irrigation déficitaire à tous les rangs d'un jardin, ce qui pourrait être préjudiciable aux autres expérimentations mises en place sur le site.

Bien qu'il y ait eu des essais les deux années précédentes sur la pomme de terre en agroforesterie, c'est la première année où l'effet d'une plus faible irrigation est testé sur le rendement des pommes de terre. Il serait intéressant de reconduire cet essai combinant les effets du microclimat agroforestier et du régime d'irrigation sur plusieurs années pour observer comment les pommes de terre se comportent pendant un réel déficit hydrique en agroforesterie.

6.4 Perspectives

Les variétés suivies dans cette étude ont potentiellement une tolérance différente à l'ombrage et à un déficit hydrique. Une étude a été réalisée sur la tolérance de 54 génotypes de pommes de terre à la sécheresse (Gervais et al., 2021). Il serait intéressant d'avoir une étude similaire comparant plusieurs génotypes de pomme de terre sur leur tolérance à l'ombrage. Ainsi, en combinant les résultats de ces deux expérimentations, il serait possible de commencer une sélection pour avoir des pommes de terre performantes agronomiquement en conditions agroforestières et dans un contexte de sécheresse et de restriction d'eau. À titre d'exemple, la variété Désirée semble tolérante à des conditions d'ombrage (Demagante & Vander Zaag, 1988), mais sensible à un stress hydrique (Gervais et al., 2021). Cette sélection permettrait aux agriculteur·ice·s de choisir une variété de pomme de terre correspondant aux conditions agroforestières présentes sur leurs parcelles.

Le projet Arbratatouille 3 s'inscrit dans une démarche en recherche participative. Il vise à approfondir et produire des connaissances et des références techniques à destination des maraîcher·es, pour répondre au mieux à leurs besoins et interrogations. Si la démarche de recherche participative permet un ancrage à la réalité du terrain, elle implique une variabilité des conditions d'expérimentation, dues aux contraintes à la fois environnementales, pédoclimatiques, variétales mais aussi de faisabilité pour les agriculteur·ice·s. Ainsi, les résultats obtenus dans cette étude sont propres aux aménagements sur les sites des Terres de Roumassouze et de la Ferme du Colibri. Pour aller vers plus de généralisation, il serait possible de reproduire cette expérience dans une dizaine de fermes agroforestières, mais cela pose la question de la faisabilité du financement d'une telle étude.

Le projet Arbratatouille 3 donne à Agroof des éléments clés concernant la conception et la gestion de systèmes agroforestiers en climat méditerranéen pour les cultures maraîchères étudiées (pomme de terre, tomate, poivron et courgette). Ces résultats, sur deux sites agroforestiers divergeants par l'aménagement et la gestion des arbres, permettent une conception plus fine de systèmes similaires.

7 Conclusion

Le maraîchage biologique diversifié dans le bassin méditerranéen est soumis à de nombreux défis technico-économiques et environnementaux. À tout cela s'ajoute le défi de l'adaptation de l'agriculture aux changements climatiques. Il est dorénavant nécessaire de concevoir, développer, et diffuser de nouveaux systèmes de cultures capables de répondre à ces problématiques. L'agroforesterie, via ses services écosystémiques, apparaît comme un levier d'adaptation aux enjeux contemporains. Malgré la conception et le développement de plus en plus fréquents de tels systèmes, peu de références techniques et scientifiques existent quant au comportement des cultures maraîchères en agroforesterie en condition de stress hydrique. Cette étude permet de caractériser et de comprendre les effets de la présence d'arbres matures ainsi que de deux régimes d'irrigation sur les performances agronomiques de la pomme de terre en zone méditerranéenne sur deux sites expérimentaux. Les Terres de Roumassouze accueillent une zone en agroforesterie intraparcellaire avec des noyers hybrides mûres et la Ferme du Colibri est organisée en verger-maraîcher avec des haies brise-vent intraparcellaires.

Une réduction du rayonnement entre 43 % et 61 % a été relevée proche ou sous les arbres comparé au témoin plein soleil. Les Terres de Roumassouze ont montré un effet tampon du microclimat agroforestier en fonction de la conduite des arbres. La température de l'air en agroforesterie est plus élevée de 1°C la nuit et inférieure jusqu'à 2,5°C en journée par rapport au témoin. La Ferme du Colibri a montré une réduction de la vitesse du vent qui a influencé les évolutions journalières de température de l'air et d'hygrométrie. Les réponses écophysiologicals de la pomme de terre sont de plusieurs ordres et semblent provenir de la modification des paramètres microclimatiques induite par la présence d'arbres. Les plantes ont développé des mécanismes de compensation de l'ombrage comme notamment l'étiollement avec une augmentation de la longueur de tige de 6 % et de 25 % sous un ombrage de 58 % et 25 % respectivement. Une corrélation positive entre la masse surfacique des feuilles et l'ouverture de canopée a été mise en évidence et rend compte d'un processus d'étalement de la biomasse en réponse à une augmentation de l'ombrage. La production a été inférieure sous les arbres avec une réduction de rendement jusqu'à 54 % en agroforesterie bien irriguée sur les Terres de Roumassouze. L'efficacité d'utilisation de l'eau a été multipliée par deux quand les pommes de terre ont été moins irriguées sous des arbres.

L'ensemble des résultats obtenus dans cette étude rendent compte de la complexité des interactions entre arbres et cultures maraîchères. Cependant, l'échelle des systèmes de culture ne permet pas une compréhension fine des processus mis en jeu. Des réplifications de cette étude sont nécessaires pour créer un réel déficit hydrique en agroforesterie afin de mieux comprendre la réponse des pommes de terre à ces conditions en zone méditerranéenne. La continuation de cette étude permettrait de mieux accompagner le développement et l'adaptation des systèmes maraîchers au changement climatique dans la région méditerranéenne.

Bibliographie

- Abdrabbo, M. A., Farag, A. A., & Abul-Soud, M. (2013). *The Intercropping Effect on Potato under Net House as Adaption Procedure of Climate Change Impacts*.
https://www.researchgate.net/publication/274897597_The_Intercropping_Effect_on_Potato_under_Net_House_as_Adaption_Procedure_of_Climate_Change_Impacts
- Agreste. (2024, octobre). *Conjoncture Auvergne-Rhône-Alpes*. https://draaf.auvergne-rhone-alpes.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/10_agreste_conjoncture_octobre_2024.pdf
- Alam, Z., Jewel, K. N. A., & Shahjahan, M. (2015). *Performance of seven winter vegetables along with four years old Akashmoni tree in charland based agroforestry system*.
- Allen, R. G., Parira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56* (FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nation).
<https://www.fao.org/4/X0490E/x0490e00.htm#Contents>
- Almekinders, C. J. M., & Struik, P. C. (1996). Shoot development and flowering in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Potato Research*, 39(4), 581-607. <https://doi.org/10.1007/BF02358477>
- Alva, A. K., Moore, A. D., & Collins, H. P. (2012). Impact of Deficit Irrigation on Tuber Yield and Quality of Potato Cultivars. *Journal of Crop Improvement*, 26(2), 211-227.
<https://doi.org/10.1080/15427528.2011.626891>
- Arrêté du 3 mars 1997 relatif au commerce des pommes de terre de primeur et des pommes de terre de conservation (1997). <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT0000000749350/>
- Arvalis. (2004). *Culture de la pomme de terre de conservation*.
- Arvalis. (2019). *Azote et pomme de terre—Bien évaluer les besoins pour maîtriser les apports*.
https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/pdt_ferti_plaquette_2019_01_21_v8_700864572317011956.pdf
- ASP. (2016). *Départs précoces en agriculture, analyse d'une situation peu connue*.
https://solidaritepaysans.org/images/imagesCK/files/zoom_sur/asp_2016_depart-precoces-agriculture_splr.pdf

- Badr, M. A., El-Tohamy, W. A., & Zaghloul, A. M. (2012). Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region. *Agricultural Water Management*, 110, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.03.008>
- Bhardwaj, D. R., Navale, M. R., & Sharma, S. (2017). Agroforestry Practices in Temperate Regions of the World. In J. C. Dagar & V. P. Tewari (Éds.), *Agroforestry* (p. 163-187). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7650-3_6
- Bio PACA. (2015). *Le mini-Guide Maraîchage bio—De la production à la vente de légumes frais et transformés*.
https://www.bio-provence.org/IMG/pdf/extrait_site_le_mini_guide_maraichage_bio_edition_2016.pdf
- Brandle, J. R., Hodges, L., Tyndall, J., & Sudmeyer, R. A. (2009). *Windbreak Practices*.
<https://doi.org/10.2134/2009.northamericanagroforestry.2ed.c5>
- Brandle, J. R., Hodges, L., & Zhou, X. H. (2004). *Windbreaks in North American agricultural systems*.
- Broyer, L. (2023, septembre 12). *Evaluation des performances agronomiques des cultures maraîchères en système agroforestiers mediterraneen—Etude de la pomme de terre (Solanum tuberosum) dans le Gard (30) et le Vaucluse (84)*.
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023). *IPCC, 2023 : Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (First)*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Camargo, D. C., Montoya, F., Ortega, J. F., & Córcoles, J. I. (2015). Potato Yield and Water Use Efficiency Responses to Irrigation in Semiarid Conditions. *Agronomy Journal*, 107(6), 2120-2131. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0572>

- Chambre d'agriculture d'Occitanie. (2023). *Agriscopie Occitanie 2023*. https://occitanie.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/Documents/Agriscopie_2023.pdf
- Chambre d'agriculture PACA. (2009). *L'agriculture irriguée méditerranéenne, une source de richesse au coeur des enjeux du développement durable*. https://paca.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Provence-Alpes-Cote_d_Azur/020_Inst_Paca/pages_regionales/Documents/Innovation/Projets_innovants/Hauts_de_Provence_Rhodanienne/Documentation/2009_AIRMF_etude_sur_le_poids_economique_de_l_irrigation_synthese.pdf
- 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. Géoscience*, 342(3), 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.02.001>
- Cichota, R., Hurtado, A. L. B., & De Jong Van Lier, Q. (2006). Spatio-temporal variability of soil water tension in a tropical soil in Brazil. *Geoderma*, 133(3-4), 231-243. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.07.010>
- Couet, E. (2023, octobre 20). *Crise du bio : Quel avenir pour la filière ?* Public Sénat. <https://www.publicsenat.fr/actualites/economie/crise-du-bio-quel-avenir-pour-la-filiere>
- del Pozo, A., Brunel-Saldias, N., Engler, A., Ortega-Farias, S., Acevedo-Opazo, C., Lobos, G. A., Jara-Rojas, R., & Molina-Montenegro, M. A. (2019). Climate Change Impacts and Adaptation Strategies of Agriculture in Mediterranean-Climate Regions (MCRs). *Sustainability*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/su11102769>
- 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. <https://doi.org/10.1007/BF02360023>
- Djaman, K., Irmak, S., Koudahe, K., & Allen, S. (2021). Irrigation Management in Potato (*Solanum tuberosum* L.) Production : A Review. *Sustainability*, 13(3), 1504. <https://doi.org/10.3390/su13031504>
- DRAAF PACA. (2024). *L'AGRICULTURE, L'AGROALIMENTAIRE ET LA FORÊT DANS LA RÉGION*.

- Dufour, L., Gosme, M., Le Bec, J., & Dupraz, C. (2020). Does pollarding trees improve the crop yield in a mature alley-cropping agroforestry system? *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(5), 640-649. <https://doi.org/10.1111/jac.12403>
- Dupraz, C., & Liagre. (2019). *L'agroforesterie : Des arbres et des cultures* (La France Agricole).
- Fabeiro, C., Martin de Santa Olalla, F., & de Juan, J. A. (2001). Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agricultural Water Management*, 48, 255-266. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00129-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00129-3)
- Ferrario, V. (2021). Learning from Agricultural Heritage? Lessons of Sustainability from Italian “Coltura Promiscua”. *Sustainability*, 13(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/su13168879>
- Foereid, B., Bro, R., Mogensen, V. O., & Porter, J. R. (2002). Effects of windbreak strips of willow coppice—Modelling and field experiment on barley in Denmark. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93(1-3), 25-32. [https://doi.org/10.1016/s0167-8809\(02\)00007-5](https://doi.org/10.1016/s0167-8809(02)00007-5)
- Foti, S., Mauromicale, G., & Ierna, A. (1995). Influence of irrigation regimes on growth and yield of potato cv. Spunta. *Potato Research*, 38(4), 307-317. <https://doi.org/10.1007/BF02357733>
- 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 irradiance¹. *American Potato Journal*, 67(3), 163-176. <https://doi.org/10.1007/BF02987069>
- Gervais, T., Creelman, A., Li, X.-Q., Bizimungu, B., De Koeyer, D., & Dahal, K. (2021). Potato Response to Drought Stress : Physiological and Growth Basis. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.698060>
- Gill, R. I. S., Singt, B., & Bhandari, N. (2015). Effect of varieties and sowing time on potato under poplar based agroforestry system. *Indian Journal of Agroforestry*, 17(1), 29-35.
- Gillespie, A. R., Jese, S., Mangel, D. B., Hoover, W. L., Pope, P. E., Seifert, J. R., Biehle, D. J., Stall, T., & Benjamin, T. J. (2000). Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 1. Production physiology. *Agroforestry Systems*, 48, 25-40.
- Gosme, M., Dufour, L., Inurreta Aguirre, H. D., & Dupraz, C. (2016). *Microclimatic effect of agroforestry on diurnal temperature cycle*. <https://doi.org/hal-02744212>

- Grigorieva, E., Livenets, A., & Stelmakh, E. (2023). Adaptation of Agriculture to Climate Change : A Scoping Review. *Climate*, 11(10), 202. <https://doi.org/10.3390/cli11100202>
- Hack, H. (1993). *Echelle BBCH de la pomme de terre*.
<https://silva.nancy.hub.inrae.fr/content/download/506/4651?version=1>
- 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.
<https://doi.org/10.1111/pce.12168>
- Hassan, A. A., Sarkar, A. A., Ali, M. H., & Karim, N. N. (2002). Effect of deficit irrigation at different growth stage on the yield of potato. *Pakistan Journal of Biological Science*, 5(2), 128-134.
- Hervieu, B., & Abis, S. (2006). Les dynamiques agricoles en Méditerranée: *Confluences Méditerranée*, N°58(3), 169-186. <https://doi.org/10.3917/come.058.0169>
- Hufty, A. (2001). *Introduction à la climatologie : Le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine*. Presses Université Laval.
- Islam, M. N., Akter, A., Alam, Z., & Rahman, G. M. M. (2015). *Effect of Eucalyptus camaldulensis tree on growth and yield of potato in agroforestry system*.
- Jackson, N. A., Wallace, J. S., & Ong, C. K. (2000). Tree pruning as a means of controlling water use in an agroforestry system in Kenya. *Forest Ecology and Management*, 126(2), 133-148.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00096-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00096-1)
- Jacobs, S. R., Webber, H., Niether, W., Grahmann, K., Lüttschwager, D., Schwartz, C., Breuer, L., & Bellingrath-Kimura, S. D. (2022). Modification of the microclimate and water balance through the integration of trees into temperate cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 109065. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109065>
- Jacques, G. (2016). Les épisodes cévenols : Un aperçu historique. *La Météorologie*, 2016(93), 50-57. <https://doi.org/10.4267/2042/59941>
- Jose, S., Gillespie, A. R., & Pallardy, S. G. (2004). *Interspecific interactions in temperate agroforestry*.

- Kanzler, M., Böhm, C., Mirck, J., Schmitt, D., & Veste, M. (2019). Microclimate effects on evaporation and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 93(5), 1821-1841. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0289-4>
- Karafyllidis, D. I., Stavropoulos, N., & Georgakis, D. (1996). The effect of water stress on the yielding capacity of potato crops and subsequent performance of seed tubers. *Potato Research*, 39(1), 153-163. <https://doi.org/10.1007/BF02358215>
- Karam, F., Amacha, N., Fahed, S., El Asmar, T., & Domínguez, A. (2014). Response of potato to full and deficit irrigation under semiarid climate : Agronomic and economic implications. *Agricultural Water Management*, 142, 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.007>
- Kiziloglu, F. M., Sahin, U., Tunc, T., & Diler, S. (2006). The effect of deficit irrigation on potato evapotranspiration and tuber yield under cool season and semiarid climatic conditions. *Journal of Agronomy*, 5(2), 284-288.
- Larousse, É. (2025). *Définitions : Microclimat - Dictionnaire de français Larousse*. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/microclimat/51182>
- 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. <https://doi.org/10.1002/wcc.301>
- Léger, F., Morel, K., Bellec-Gauche, A., & Warlop, F. (2019). *SMART - Agroforesterie maraîchère : Un choix stratégique pour garantir une durabilité en transition agroécologique ?* *Innovations Agronomiques* 71, 259-273. <https://doi.org/10.15454/EK0390>
- Liu, F., Shahnazari, A., Andersen, M. N., Jacobsen, S.-E., & Jensen, C. R. (2006). Effects of deficit irrigation (DI) and partial root drying (PRD) on gas exchange, biomass partitioning, and water use efficiency in potato. *Scientia Horticulturae*, 109(2), 113-117. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.04.004>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.117>
- Marsden, C., Martin-Chave, A., Cortet, J., Hedde, M., & Capowiez, Y. (2020). How agroforestry systems influence soil fauna and their functions—A review. *Plant and Soil*, 453(1-2), 29-44.

<https://doi.org/10.1007/s11104-019-04322-4>

Martin-Chave, A., Béral, C., Mazzia, C., & Capowiez, Y. (2019). Agroforestry impacts the seasonal and diurnal activity of dominant predatory arthropods in organic vegetable crops.

Agroforestry Systems, 93(6), 2067-2083. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0309-4>

Mathur, S., Agrawal, D., & Jajoo, A. (2014). Photosynthesis : Response to high temperature stress.

Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 137, 116-126.

<https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.01.010>

Mayer, S., Wiesmeier, M., Sakamoto, E., Hübner, R., Cardinael, R., Kühnel, A., & Kögel-Knabner, I. (2022). Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 323, 107689.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107689>

MedECC. (2020). *Changement climatique et environnemental dans le bassin Méditerranéen, Situation actuelle et risque pour le future.*

https://www.medecc.org/wp-content/uploads/2021/05/MedECC_MAR1_SPM_FRA.pdf

Meteociel. (2025a). *Meteociel—Climatologie mensuelle de Avignon (84).*

https://www.meteociel.fr/climatologie/obs_villes.php?code=7563&mois=3&annee=2025

Meteociel. (2025b). *Meteociel—Climatologie mensuelle de Nîmes—Courbessac (30).*

https://www.meteociel.fr/climatologie/obs_villes.php?code=7645&mois=4&annee=2025

Ministère de la transition écologique. (2019). *Agriculture*. <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/secteurs-d-activites/agriculture>

Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. (2024, février). *L'irrigation des surfaces agricoles : Évolution entre 2010 et 2020.*

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/7165/download?inline>

Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire. (2023). *La haie levier de la planification écologique*. <https://agriculture.gouv.fr/la-haie-levier-de-la-planification-ecologique>

Nasir, M. W., & Toth, Z. (2022). Effect of Drought Stress on Potato Production : A Review.

Agronomy, 12(3), 635. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030635>

Nations-Unis. (2006). *Norme CEE-ONU-FFV-2.*

- Niu, Y., Zhang, K., Khan, K. S., Fudjoe, S. K., Li, L., Wang, L., & Luo, Z. (2024). Deficit Irrigation as an Effective Way to Increase Potato Water Use Efficiency in Northern China : A Meta-Analysis. *Agronomy*, 14(7), 1533. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071533>
- 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. <https://doi.org/10.1017/S0021859698005541>
- Onder, S., Caliskan, M. E., Onder, D., & Caliskan, S. (2005). Different irrigation methods and water stress effects on potato yield and yield components. *Agricultural Water Management*, 73(1), 73-86. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.023>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.08.008>
- Patel, N., & Rajput, T. B. S. (2007). Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato. *Agricultural Water Management*, 88(1-3), 209-223. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.017>
- Photosynthetically Active Radiation. (1981). In K. J. McCree, *Physiological Plant Ecology I* (p. 41-55). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-68090-8_3
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x>
- Quandt, A., Neufeldt, H., & Gorman, K. (2023). Climate change adaptation through agroforestry : Opportunities and gaps. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 60, 101244. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101244>
- Quinkenstein, A., Wöllecke, J., Böhm, C., Grünwald, H., Freese, D., Schneider, B. U., & Hüttel, R. F. (2009). Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe. *Environmental Science & Policy*, 12(8), 1112-1121. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.08.008>
- 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), Article 9. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091888>

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. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040356>

Rolbiecki, S., Rolbiecki, R., Kuśmierek-Tomaszewska, R., Dudek, S., & Rzekanowski, C. (2015). REQUIREMENTS AND EFFECTS OF DRIP IRRIGATION OF MID-EARLY POTATO ON A VERY LIGHT SOIL IN MODERATE CLIMATE. *Fresenius Environmental Bulletin*, 11.

Rousselle, P., Robert, Y., & Crosnier, J.-C. (1996). *La pomme de terre : Production, amélioration, ennemis et maladies, utilisations*. Editions Quae.

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. <https://doi.org/10.1007/s12230-015-9436-x>

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

Shock, C., Feibert, E. B. G., & Saunders, L. D. (1998). Potato yield and quality response to deficit irrigation. *HortScience*, 33(4), 655-659.

Shock, & Wang, F.-X. (2011). Soil Water Tension, a Powerful Measurement for Productivity and Stewardship. *HortScience*, 46(2), 178-185. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.2.178>

Siddiqui, A. O., Işık, D., & Jabran, K. (2024). Impact of Weed Competition on Morphological and Biochemical Traits of Potato : A Review. *Potato Research*, 67(2), 451-462. <https://doi.org/10.1007/s11540-023-09647-3>

Smith, D. J. (2010). *Agroforestry : Reconciling Production with Protection of the Environment, A Synopsis of Research Literature*.

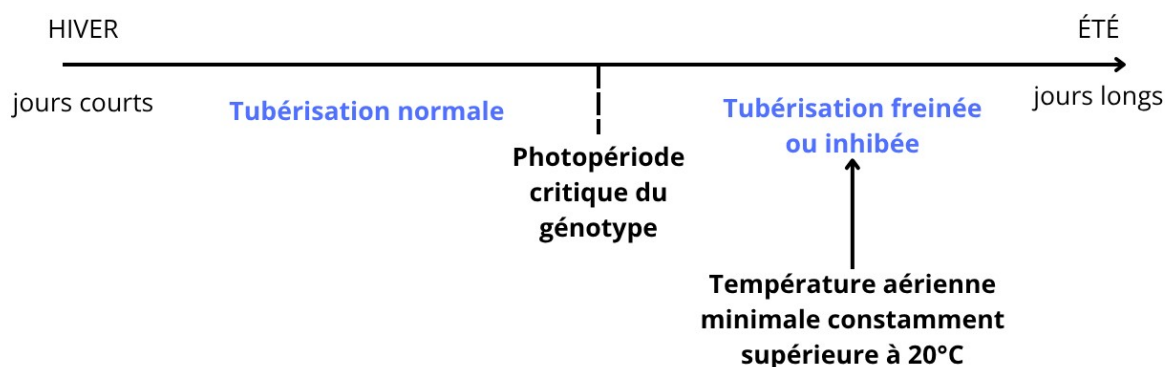
Soubeyroux, J.-M., Dubuisson, B., Bernus, S., Samacoïts, R., Rousset, F., Schneider, M., Drouin, A., Madec, T., Thardy, M., & Corre, L. (2024). *À quel climat s'adapter en France selon la*

TRACC ? <https://meteofrance.fr/actualite/presse/climat-futur-meteo-france-rapport-sur-levolution-temperatures-et-precipitations>

- 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.
<https://doi.org/10.1007/BF02358019>
- Sun, D., & Dickinson, G. R. (1997). Early growth of six native Australian tree species in windbreaks and their effect on potato growth in tropical northern Australia. *Forest Ecology and Management*, 95(1), 21-34. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00005-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00005-4)
- Timlin, D., Lutfor 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.
<https://doi.org/10.2134/agronj2005.0260>
- Tsonkova, P., Böhm, C., Quinkenstein, A., & Freese, D. (2012). Ecological benefits provided by alley cropping systems for production of woody biomass in the temperate region : A review. *Agroforestry Systems*, 85(1), 133-152. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9494-8>
- Vennetzel, E. (2011, août). *Cultiver la pomme de terre de plein champs en agriculture biologique—Repères technico-économiques*. https://devab.itab-lab.fr/Projets/LPCBio_fiche%20ITK-pdt.pdf
- Verstraete, C. (2024). *Evaluation des performances agronomiques de la culture de la pomme de terre (Solanum tuberosum) en agroforesterie maraîchère en climat méditerranéen*.
- Walworth, J. L., & Carling, D. E. (2002). Tuber initiation and development in irrigated and non-irrigated potatoes. *American Journal of Potato Research*, 79(6), 387-395.
<https://doi.org/10.1007/BF02871683>
- Warlop, F. (2018, juin 6). Les vergers maraîchers observés par le réseau SMART. *Produire Bio*. <https://www.produire-bio.fr/articles-pratiques/les-vergers-maraichers-observees-par-le-reseau-smart/>
- Warlop, F., Corroyer, N., Denis, A., Conseil, M., Fourrié, L., Duha, G., Buchmann, C., Lafon, A., & Servan, G. (2017). *Associer les légumes et arbres fruitiers en agroforesterie : Principes, éléments techniques et points de vigilance pour concevoir et conduire sa parcelle*.

- 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.
<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. <https://doi.org/10.1007/BF02358011>
- Yuan, B.-Z., Nishiyama, S., & Kang, Y. (2003). Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip-irrigated potato. *Agricultural Water Management*, 63(3), 153-167.
[https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00174-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00174-4)

Annexes



Annexe 1 : Schéma de l'effet de la photopériode et de la température sur la tubérisation des pommes de terre

Annexe 2 : Tableau de synthèse des itinéraires techniques pour la conduite des pommes de terre sur les 2 sites expérimentaux

	Les Terres de Roumassouze			La Ferme du Colibri
	C	T	L	AF-Haie et témoin
<i>Précédent</i>	Pomme de terre			Engrais vert (avoine et vesce broyé deux fois)
<i>Préparation du sol</i>	1 travail du sol à 10 cm 2 passages de herse rotative à 5 cm			Sarclage en surface + griffe + rotofraise en surface
				+ griffe (plantation dans le sillon du milieu)
<i>Implantation</i>	1 ^{er} avril 2025			24 mars 2025
<i>Mode de culture</i>	Sous paillage de 30 cm			2 buttages successifs
<i>Fertilisation</i>	5,25 kg/rang Ovbio (NPK : 4-3-10)			Sur toute la planche de culture 129kg de MV100 + 64kg d'Ovbio (NPK : 4-3-10)
<i>Irrigation</i>	Goutte-à-goutte			
<i>Entretien de la culture intercalaire</i>	5 passages de débroussailluse dans l'inter-rang et récolte de doryphores 2 fois par semaine pendant mai et juin			Enherbement : les buttages en début de culture équivalent à des sarclages dans l'inter-rang Doryphore : 1 passage huile essentielle de pamplemousse
<i>Entretien de la ligne arborée</i>	5 passages de débroussailluse sur la bande enherbée			1 passage de griffe à 1 m des arbres avant la mise en culture de la planche de pomme de terre
<i>Problèmes rencontrés</i>	Forte pression de doryphore en début de saison, énorme pression de rat taupier invisible avant la récolte			Forte pression de l'enherbement (sorgho d'Alep)
<i>Récolte</i>	23 juillet 2025			16 juillet 2025

Annexe 3 : Stades phénologiques sélectionnés pour le suivi du développement de la pomme de terre. Source : échelle BBCH des stades phénologiques de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) Hack et al. 1993

Stade de développement	Code	Description
0 – Germination	09	Levée : les tiges percent la surface du sol
1 – Développement foliaire	10	Les premières feuilles s’allongent, cotylédons complètement étalés
	11	La première feuille de la tige principale est étalée (> 4 cm)
	12	La deuxième feuille de la tige principale est étalée (> 4 cm)
	1.	Et ainsi de suite ...
	19	Ou d’avantage de feuilles de la tige principale sont étalée (> 4 cm)
5 – Apparition de l’inflorescence	51	Les premiers boutons floraux (1-2 mm) de la première inflorescence (celle de la tige principale) sont visibles
	55	Les boutons de la première inflorescence ont 5 mm
	59	Les premiers pétales sont visibles sur la première inflorescence
6 – Floraison	60	Les premières fleurs du plant sont ouvertes
	61	Début floraison : 10 % des fleurs de la première inflorescence
	6.	Et ainsi de suite
	69	Fin de floraison sur la première inflorescence
7 – Développement du fruit	70	Les premières baies sont visibles
	71	10 % des baies de la première inflorescence (tige principale) ont atteint leur taille finale
	7.	Et ainsi de suite
9 – Sénescence	91	Début de la décoloration des feuilles
	93	La plupart des feuilles sont jaunâtres
	95	50 % des feuilles sont brunes
	97	Feuilles et tiges sont mortes, les tiges sont décolorées et sèches