



Mémoire de Fin d'Etudes

Master 2 Mention Biologie Végétale (BV) Parcours : GSP

Année universitaire 2021-2022

Croissance et développement des vignes en agroforesterie en contexte méditerranéen

Par : Antonin BOSC

Soutenu à Angers le : 07/09/2022

Maître de stage : Camille BERAL



UNIVERSITÉ DE NANTES

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné (e), Antonin BOSC

déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire.

Signature :

Remerciements

Je remercie tout particulièrement Camille Béral, chargée de recherche à AGROOF, qui a été ma maîtresse de stage. Je tiens à lui adresser tous mes remerciements pour le partage de ses connaissances sur l'agroforesterie en général. Je la remercie également pour sa présence et le temps qu'elle m'a consacré lors des expérimentations sur le terrain ainsi que pour son soutien dans la rédaction de ce dossier.

Je remercie Ambroise Martin-Chave, chargé de recherche à AGROOF, qui a été mon co-encadrant pendant ce stage., pour son aide précieuse concernant la réalisation des mesures sur le terrain ainsi que le traitement statistique des données.

Je remercie également tous les autres membres de l'équipe d'AGROOF pour leur accueil ainsi que leur bonne humeur, qui m'ont permis de bien m'intégrer au sein de la SCOP et de rendre mon stage agréable et très enrichissant.

Enfin, je tiens sincèrement à remercier toutes les personnes qui ont participé à la réussite de mon stage.

Glossaire

Agrégat : assemblage élémentaire constitué de particules minérales du sol, de ciments et de vides intra-agrégats.

Canopée : zone d'une forêt qui correspond à la cime des grands arbres.

Etat hydrique : niveau de stress hydrique d'une plante. Il est mesuré en estimant la capacité des cellules végétales à retenir l'eau : moins il y aura d'eau libre dans la plante, plus la pression nécessaire pour la faire sortir sera forte.

Evapotranspiration : processus de transfert d'une quantité d'eau vers l'atmosphère, par la transpiration des plantes et l'évaporation de l'eau du sol.

Houppier : sommet d'un arbre.

Point de compensation : valeur de l'intensité lumineuse ou de la teneur en CO₂ pour lesquelles la photosynthèse et la respiration s'équilibrent.

Résilience : capacité d'un agrosystème à s'adapter aux perturbations ou à revenir à un régime de routine face à un milieu changeant.

Tension du sol : quantité d'eau disponible dans le sol pour les racines des plantes. Elle est corrélée à la force de succion que la racine doit exercer pour extraire l'eau disponible.

Table des matières

Table des figures

Table des tableaux

Table des annexes

1.	Introduction.....	1
1.1	La vigne en méditerranée face au changement climatique	1
1.2	L'agroforesterie	1
1.2.1	Généralités	1
1.2.2	Intérêts	2
1.2.3	L'agroforesterie viticole en méditerranée	3
1.3	Missions et objectifs du stage chez Agroof	3
1.4	Etat de l'art sur l'agroforesterie viticole	4
1.4.1	Impacts de l'agroforesterie sur le microclimat	4
1.4.2	Comportement de la vigne en système agroforestier	5
1.5	Hypothèses posées.....	7
2.	Matériel et méthode	7
2.1	Sites expérimentaux.....	7
2.1.1	Site n°1	7
2.1.1.1	Caractéristiques de la parcelle	7
2.1.1.2	Dispositif expérimental	8
2.1.2	Site n°2	8
2.1.2.1	Caractéristiques de la parcelle	8
2.1.2.2	Dispositif expérimental	8
2.1.3	Site n°3	9
2.1.3.1	Caractéristiques de la parcelle	9
2.1.3.2	Dispositif expérimental	9
2.2	Caractérisation du microclimat et de l'état hydrique du sol.....	9
2.2.1	Caractérisation de la température et de l'humidité relative de l'air	9
2.2.2	Caractérisation du rayonnement photosynthétiquement actif.....	10
2.2.3	Caractérisation de l'état hydrique du sol	10
2.3	Croissance et développement de la vigne	11
2.3.1	Suivi phénologique et sanitaire	11
2.3.2	Suivi de croissance.....	11
2.3.3	Suivi de l'état hydrique de la vigne	12
2.4	Traitement statistique	12
3.	Résultats.....	13
3.1	Caractérisation du microclimat et de l'état hydrique du sol.....	13

3.1.1	Caractérisation de la température et de l'humidité relative de l'air	13
3.1.2	Caractérisation du rayonnement photosynthétiquement actif	14
3.1.3	Caractérisation de l'état hydrique du sol	14
3.2	Croissance et développement de la vigne	16
3.2.1	Suivi phénologique et sanitaire	16
3.2.2	Suivi de croissance.....	16
3.2.3	Suivi de l'état hydrique de la vigne	17
4.	Discussion	18
4.1	Effets des aménagements agroforestiers sur le développement de pathogènes fongiques	18
4.2	Effets des aménagements agroforestiers sur la croissance végétative de la vigne	19
4.3	Effets des aménagements agroforestiers sur l'état hydrique de la vigne.....	21
4.4	Perspectives.....	22
5.	Conclusion	23
6.	Bibliographie.....	24
7.	Sitographie	25

ANNEXES

Table des figures

Figure 1 : Bocage dans l'Aveyron

Figure 2 : Sylvopastoralisme (vaches et chênes)

Figure 3 : Prés-verger en Normandie (vaches et arbres fruitiers)

Figure 4 : Association de rangs d'arbres et de cultures (blé et noyers)

Figure 5 : Effets des aménagements agroforestiers sur le microclimat, la biodiversité et le sol

Figure 6 : Parcelle cultivée en oulière en 1867 (a) et oulière dans le Dauphiné (b)

Figure 7 : Parcelle cultivée en hautains il y a 150 ans (a) et hautain en Drôme Provençale (b)

Figure 8 : Modification du bilan hydrique à proximité d'un arbre.

Figure 9 : Ecoulement de l'air au-dessus et à travers un aménagement brise-vent.

Figure 10 : Evolution de l'évapotranspiration en fonction de la distance (H) au brise-vent.

Figure 11 : Localisation des trois parcelles suivies.

Figure 12 : Dispositif expérimental du site n°1.

Figure 13 : Dispositif expérimental du site n°2.

Figure 14 : Dispositif expérimental du site n°3.

Figure 15 : Sonde VOLTcraft DL-121TH sous abris.

Figure 16 : Boîtier e-PépiPIAF connecté à un capteur Solem PAR 80 et à deux tensiomètres Watermark.

Figure 17 : Chambre à pression.

Figure 18 : Températures journalières moyennes sur le site n°1.

Figure 19 : Tension du sol sur le site n°1.

Figure 20 : Tension du sol sur le site n°3.

Figure 21 : Potentiel de base moyen sur le site n°1.

Figure 22 : Evolution des stades phénologiques de la vigne.

Figure 23 : Longueur totale des rameaux de chaque cep.

Figure 24 : Indice de croissance des apex pour le site n°1.

Figure 25 : Indice de croissance des apex pour le site n°2.

Figure 26 : Indice de croissance des apex pour le site n°3.

Figure 27 : Potentiel de feuille pour le site n°1.

Figure 28 : Potentiel de feuille pour le site n°2.

Figure 29 : Potentiel de feuille pour le site n°3.

Table des tableaux

Tableau I : Nombre de mesures effectuées pour chaque variable sur les trois sites expérimentaux.

Tableau II : Ecart de température et d'humidité entre les modalités et le témoin.

Tableau III : Ecart de valeur de PAR entre les modalités et le témoin.

Table des annexes

Annexe I : Echelle BBCH des stades phénologiques de la vigne.....	I
Annexe II : Tests statistiques appliqués à chaque variable.	II
Annexe III : Rayonnement photosynthétiquement actif journalier moyen sur les sites n°1 et 3.....	III



Figure 1 : Bocage dans l'Aveyron (source : Agroof)



Figure 2 : Sylvopastoralisme (vaches et chênes) (source : Agroof)



Figure 3 : Prés-verger en Normandie (vaches et arbres fruitiers) (source : Agroof)



Figure 4 : Association de rangs d'arbres et de cultures (blé et noyers) (source : Agroof)

1. Introduction

1.1 La vigne en méditerranée face au changement climatique

748 600 hectares de vignes étaient cultivés en France en 2019, dont 219 600 et 85 700 ha implantés respectivement dans l'ancienne région Languedoc-Roussillon et en région Provence-Alpes-Côte d'azur. Ainsi, la zone méditerranéenne regroupe environ 40% des surfaces du vignoble français, ce qui en fait la première aire de production viticole française [\[1\]](#).

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique, la vigne doit faire face à des étés de plus en plus chauds et secs, notamment en climat méditerranéen. Cela entraîne des conséquences directes sur la phénologie de la vigne et la qualité de la récolte, comme une augmentation plus rapide de la concentration en sucres au cours du murissement du raisin, ou encore une baisse de l'acidité au moment de la période de vendanges (Van Leeuwen and Destrac-Irvine, 2017). Cette dernière est de plus en plus précoce. Elle a été avancée de 15 jours en moyenne sur l'ensemble du territoire français depuis 1980. En plus de ces tendances, les viticulteurs doivent faire face à des événements extrêmes : canicules de 2003 et 2006, printemps très chaud et sec de 2011, été très pluvieux en 2013, sécheresse de l'été 2019, gel de printemps en 2021 [\[2\]](#).

Des stratégies d'adaptation des pratiques agricoles sont mises en œuvre par la filière viticole pour anticiper ces changements. Parmi les innovations techniques à développer il est possible de citer les pratiques agroécologiques dont la mise en place de couverts végétaux ou encore l'agroforesterie. Cette dernière pratique présente un potentiel intéressant pour améliorer la résilience* de la vigne face au réchauffement climatique.

1.2 L'agroforesterie

1.2.1 Généralités

L'agroforesterie correspond à l'association d'arbres, de cultures et/ou d'animaux sur la même parcelle, en bordure ou en plein champ. L'intégration d'arbres au sein de la parcelle agricole permet une diversification de la production sur le long terme et une optimisation de l'utilisation des ressources du milieu. Cette pratique agricole ancienne inclut des systèmes très diversifiés selon les pratiques et les contraintes des agriculteurs :

- Le bocage : forme la plus répandue en France qui allie prairies destinées au pâturage et haies fournissant du bois de chauffage (figure 1) ;
- Les systèmes sylvo-pastoraux : association d'une prairie pâturée avec des arbres intraparcels destinés à la production forestière (figure 2) ;
- Les prés-vergers : pratique retrouvée essentiellement en Bretagne, Normandie et Pays de la Loire, qui mêle pâturage et arbres fruitiers (pommiers, poiriers) (figure 3)

- Les arbres associés à des cultures : alignements d'arbres intraparcellaires (noyers, peupliers, merisiers) combinés à des cultures intercalaires (blé, maïs, sorgho) (figure 4) (Dupraz and Liagre, 2019).

La politique agricole d'après-guerre incitant les agriculteurs à produire davantage en agrandissant leurs parcelles (remembrement), en mécanisant de plus en plus leurs exploitations et en utilisant des produits phytosanitaires, a conduit à la réduction des linéaires de haies et d'arbres. Aujourd'hui, face aux nombreux enjeux rencontrés par l'agriculture (améliorer la qualité et la quantité des productions agricoles, réduire l'utilisation de produits phytosanitaires, faire face au changement climatique), les aménagements arborés sont revisités car à même de contribuer à de nombreuses fonctions écologiques et économiques en améliorant la résilience des parcelles agricoles au changement climatique [3]. C'est dans l'objectif d'encourager cette pratique que le ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt a lancé le « Plan de développement de l'agroforesterie » en 2015 [3]. Ainsi, les agriculteurs peuvent bénéficier de subventions pour les soutenir dans leurs projets de plantation.

1.2.2 Intérêts

En modifiant les flux radiatifs et aériens, l'introduction d'arbres dans une parcelle agricole est susceptible d'avoir un effet sur le microclimat (température, humidité, ensoleillement), ce qui peut impacter le comportement et les performances de la vigne. Cet aspect faisant entièrement partie du sujet d'étude, il sera davantage développé dans le paragraphe état de l'art.

Concernant la biodiversité, de nombreuses études démontrent que la simplification des paysages dans les grandes zones agricoles réduit l'abondance et la diversité des ennemis naturels des ravageurs des cultures (Benton *et al.*, 2003). Même s'il existe peu d'études concernant l'évaluation de la biodiversité dans les systèmes viticoles agroforestiers, des travaux ont montré que les populations de thrips prédateurs, d'acariens prédateurs, de coccinelles et de parasitoïdes étaient plus abondantes à proximité des zones boisées situées en bordure de parcelle (Thomson and Hoffmann, 2009; Thomson *et al.*, 2010). Ainsi, l'introduction d'arbres ou de haies dans ces agrosystèmes permettrait de recréer des habitats semi-naturels qui pourraient favoriser le retour d'espèces prédatrices d'insectes ravageurs. Au niveau du sol, le paillage généré par la chute des feuilles ainsi que les racines des arbres permettent de réduire le ruissellement de surface et l'érosion des sols, tout en augmentant l'infiltration de l'eau dans le sol (Riha and McIntyre, 1999). Les arbres permettent d'améliorer le stockage de carbone dans le sol (Cardinael *et al.*, 2017) et peuvent favoriser l'accroissement de la densité de la macrofaune ainsi que la diversité des vers de terre (D'Hervilly *et al.*, 2022), ce qui conduit à la formation d'agrégats* qui créent des micro- et macropores dans le sol, capables de retenir des quantités d'eau plus importantes.

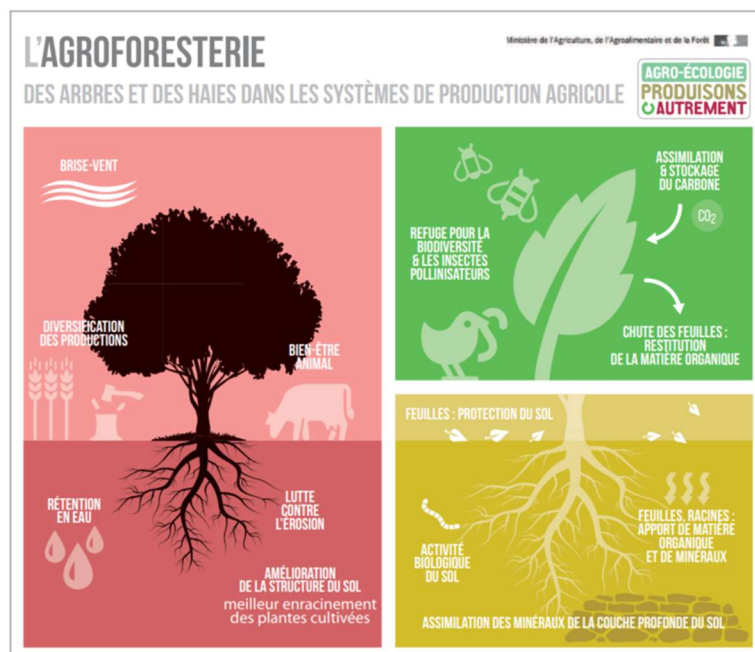


Figure 5 : Effets des aménagements agroforestiers sur le microclimat, la biodiversité et le sol (source : ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la forêt)

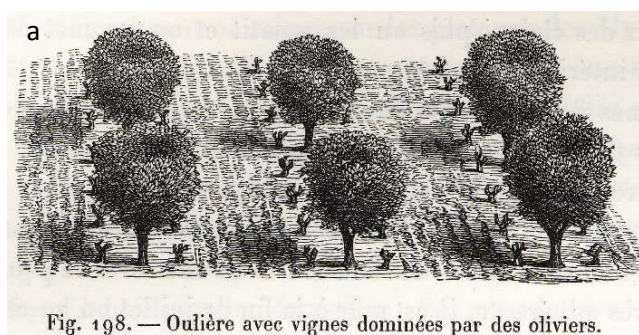


Figure 6 : Parcelle cultivée en oulière en 1867 (a) et oulière dans le Dauphiné (b) (source : Agrooof)

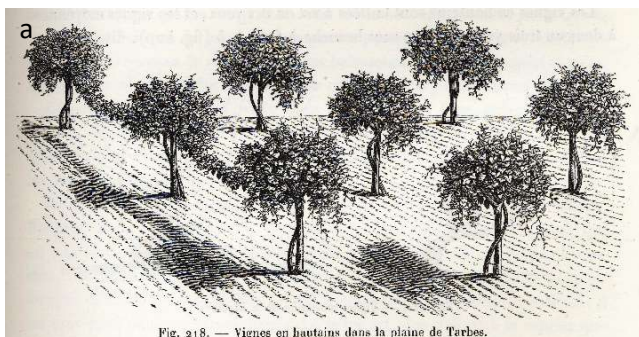


Figure 7 : Parcelle cultivée en hautains il y a 150 ans (a) et hautain en Drôme Provençale (b) (source : Agrooof)

A terme, la parcelle pourrait-être plus résistante à la sécheresse et moins dépendante de l'irrigation. Cependant, les arbres prélèvent aussi de l'eau dans le sol, ce qui peut induire des risques de compétition avec la vigne. Il est donc nécessaire de comprendre comment se partage la ressource entre les arbres et la vigne selon les différents contextes de sols, de climats et d'aménagements agroforestiers.

Ainsi, l'agroforesterie présente de nombreux atouts pour faire face au réchauffement climatique (figure 5). L'introduction d'arbres au sein ou autour des parcelles agricoles entraîne des interactions pouvant être bénéfiques ou non à la culture. L'enjeu est de mieux comprendre ces interactions pour pouvoir concevoir et piloter des systèmes agroforestiers plus performants.

1.2.3 L'agroforesterie viticole en méditerranée

Depuis l'antiquité, la vigne est cultivée en association avec des arbres selon différentes pratiques :

- Les oulières : vignes buissonnantes plantées en espacements larges (plus de 5 m) cultivées en céréales, avec dans certains cas une complantation d'arbres fruitiers (figure 6a, 6b)
- Les joualles : complantation de vignes et d'arbres fruitiers (pêchers, cerisiers, amandiers, chênes truffiers), servant souvent de système transitoire entre une vigne et un verger
- Les hautains : vignes palissées sur des arbres (ormes, érables, noyers, chênes) (figure 7a, 7b). Cette dernière pratique est encore présente dans le Dauphiné, là où le risque de gel reste élevé (Dupraz and Liagre, 2019).

Bien que ces systèmes de production aient été abandonnés peu à peu, la dynamique actuelle autour de cette pratique est grandissante. Des viticulteurs commencent à s'interroger sur l'intérêt de l'association d'aménagements arborés avec la vigne. Dans ce cadre-là, plusieurs groupements se sont formés : le GIEE (Groupement d'Intérêt Economique et Environnemental) « AARC en Vigne », regroupant 50 vigneron ; le GIEE du Ventoux, réunissant 15 viticulteurs et la Chambre d'agriculture du Vaucluse ; le groupe thématique « Arbres en Vignes » animé par Arbres et Paysages de l'Aude ; ou encore l'association VIVR' dans le Gard, réunissant 5 vigneron de la vallée de la Robiac, en partenariat avec Agroof. Aujourd'hui, il est nécessaire d'acquérir davantage de références techniques et agronomiques pour créer des systèmes durables, au sein desquels les échanges de services sont favorisés et les phénomènes de compétition limités, d'où l'intérêt de cette étude.

1.3 Missions et objectifs du stage chez Agroof

Agroof est une SCOP (Société Coopérative et Participative), créée en 2000 et spécialisée dans l'étude et le développement des systèmes agroforestiers en France. Elle propose des formations, accompagne des projets agroforestiers et mène des travaux de recherche et de développement en partenariat avec des organismes de recherche, des organismes techniques et des agriculteurs. Agroof est également engagée dans l'évolution des réglementations autour de l'arbre et de la haie dans le milieu agricole.

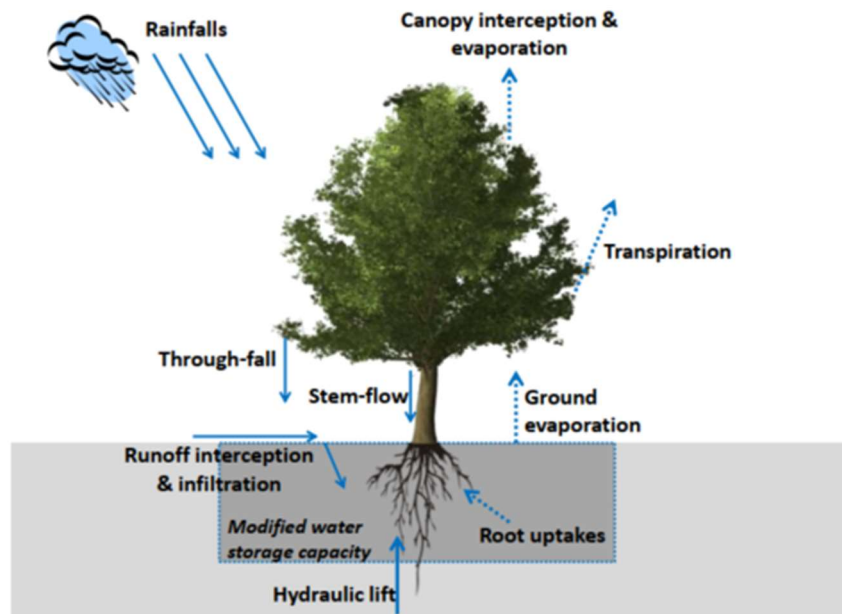


Figure 8 : Modification du bilan hydrique à proximité d'un arbre. Les lignes pleines représentent les entrées d'eau dans le sol tandis que les lignes en pointillés représentent les pertes en eau. D'une part les arbres modifient la distribution des précipitations par leur canopée selon plusieurs mécanismes : l'interception des précipitations par la canopée, l'évapotranspiration, le through-fall (égouttement des feuilles) et le stem-flow (écoulement de l'eau le long du tronc). D'autre part, ils ont un impact sur la réserve en eau du sol en modifiant le taux de ruissellement, d'infiltration, d'évaporation et de remobilisation de l'eau du sol (hydraulic lift) (source : Grimaldi, 2018)

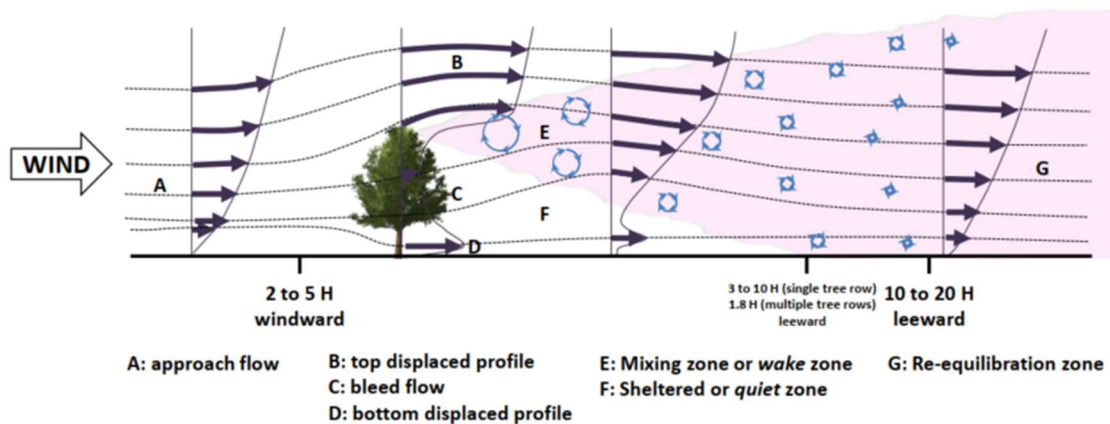


Figure 9 : Ecoulement de l'air au-dessus et à travers un aménagement brise-vent. Les flèches indiquent les directions théoriques du vent. H correspond à la hauteur de l'aménagement. La zone de calme (quiet zone) en aval du brise vent peut varier de 5 à 20 H selon la porosité de l'aménagement (source : Grimaldi, 2018, adapté de Judd *et al.*, 1996; Cleugh, 1998)

Parmi les différents projets de recherche et développement, le projet VITAM (Viticulture et Agroforesterie Méditerranéenne) s'intéresse à l'intégration de l'agroforesterie dans les parcelles viticoles. Ce projet va être conduit sur une durée de trois ans (de 2022 à 2024), en partenariat avec les Chambres d'Agriculture de l'Hérault (34) et du Vaucluse (84), l'UMR ABSYS (Unité Mixte de Recherche sur les Agrosystèmes Biodiversifiés), le Syndicat des Côtes du Rhône ainsi que l'Institut Français de la Vigne et du Vin. Il est financé par l'OFB (Organisme Français de la Biodiversité) et la Fondation de France.

Le projet VITAM a pour objectif d'acquérir des références scientifiques et techniques pour faciliter l'implantation de l'agroforesterie viticole en climat méditerranéen, en collectant des données agronomiques et économiques ainsi qu'en mettant en place des sites d'expérimentations participatifs sur le long terme. Les missions du projet peuvent être réparties en cinq actions :

- Action 1 : mener à bien le projet en s'assurant de la bonne progression du projet
- Action 2 : favoriser les échanges techniques autour de l'agroforesterie viticole et évaluer la rentabilité de l'association vigne/arbre
- Action 3 : évaluer les performances agronomiques des vignes en système agroforestier
- Action 4 : mettre en place des sites d'expérimentations participatifs
- Action 5 : communiquer sur le projet

La présente étude s'inscrit dans l'action 3 et vise à évaluer l'impact de la présence de haies et d'alignements intraparcellaires sur la physiologie, l'état hydrique, la vigueur et l'état sanitaire des vignes ; en lien avec les modifications microclimatiques.

1.4 Etat de l'art sur l'agroforesterie viticole

1.4.1 Impacts de l'agroforesterie sur le microclimat

En modifiant les flux radiatifs et aériens, les arbres sont susceptibles d'avoir un effet sur le microclimat de la parcelle (température, humidité, ensoleillement). Dans les parcelles agroforestières, la canopée* des arbres intercepte une partie de la lumière du soleil, ce qui réduit partiellement l'ensoleillement et la température de l'air à l'ombre des arbres (Artru *et al.*, 2017 ; Grimaldi, 2018). Les arbres modifient également le bilan hydrique à l'échelle de la parcelle. Ils agissent au niveau des apports d'eau dans le sol, de la capacité de rétention de l'eau par le sol et des prélèvements d'eau (soit dû à l'évaporation du sol, soit à la transpiration des arbres) (figure 8) (Bayala and Wallace, 2015).

Les pratiques agroforestières modifient aussi la circulation de l'air au sein de la parcelle, ce qui influence également le microclimat. La hauteur des arbres, la densité du houppier* et le type de conduite des arbres (taillé en tige ou en forme buissonnante) contribuent à la variation des courants aériens. Dans le cas d'un aménagement à effet brise vent, seulement une partie de l'air traverse les arbres, ce qui crée une zone

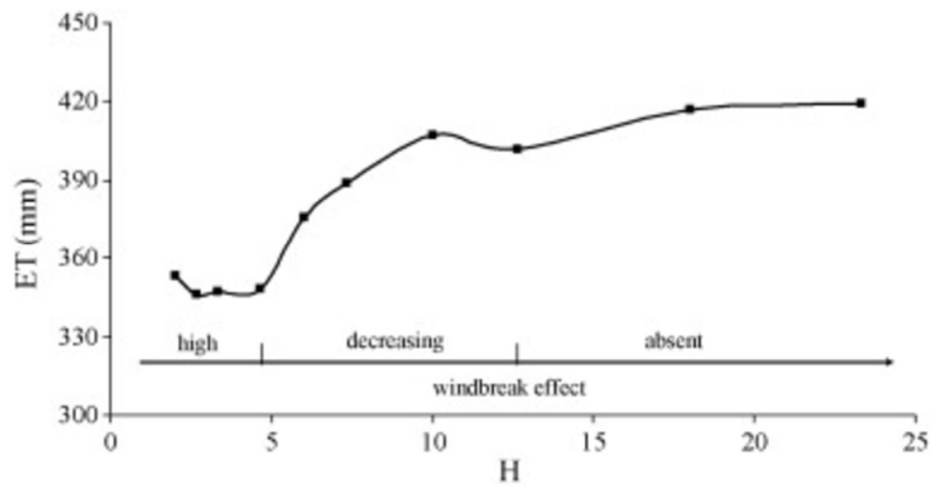


Figure 10 : Evolution de l'évapotranspiration en fonction de la distance (H) au brise-vent. Ces mesures ont été effectuées en climat méditerranéen, sur une parcelle de blé avec une haie brise-vent de cyprès de l'Arizona d'une porosité estimée à 40%. On remarque qu'au-delà de 12,7 H (H étant la hauteur de l'aménagement) l'évapotranspiration n'est pas modifiée par le brise vent (ET = 418mm). Entre 5 et 12,7 H l'évapotranspiration diminue en se rapprochant du brise-vent et en dessous de 5 H l'évapotranspiration est minimale (ET = 351 mm) (source : Campi *et al.*, 2009)

abritée en aval de l'obstacle (F) qui s'étend de 5 jusqu'à environ 20 fois la hauteur de l'aménagement (H) selon sa porosité (figure 9) (Cleugh, 1998).

Grâce aux mécanismes abordés précédemment, les arbres peuvent ainsi permettre d'atténuer les températures extrêmes (réduction des fortes chaleurs en été et protection contre les gelées tardives au printemps) au sein de la parcelle et de protéger les cultures face aux événements climatiques extrêmes (grêle, tempête...). Ainsi, les systèmes agroforestiers seraient plus résilients face au changement climatique que les cultures pures.

1.4.2 Comportement de la vigne en système agroforestier

Les modifications du microclimat induites par les arbres à l'échelle de la parcelle peuvent avoir un impact sur le comportement de la vigne située à proximité des aménagements agroforestiers.

Tout d'abord, l'ombre générée par les arbres réduit de manière significative le stress thermique de la vigne (Grimaldi, 2018). Les vignes placées à l'ombre présentent un rapport racines/parties aériennes ainsi qu'un point de compensation* plus faible (Heuvel *et al.*, 2004), ce qui peut induire un accroissement de l'efficacité de la photosynthèse et de l'assimilation du CO₂ (Freeman *et al.*, 1982). A l'ombre des arbres, (Bourgade *et al.*, 2020) ont observé une réduction de la température de l'air de 1,5°C côté Sud des alignements d'arbres au-delà de 30°C lors des journées estivales. Cet effet tampon des arbres sur la température de l'air permet de limiter les effets délétères des températures élevées sur le processus de maturation des baies et ainsi de maintenir une bonne qualité du raisin dans les régions où les températures estivales sont élevées, comme en méditerranée (Abeyasinghe *et al.*, 2019).

De plus, la présence d'alignements d'arbres modifie l'évapotranspiration* de la culture en agissant sur plusieurs paramètres. Un brise vent ralentit la vitesse du vent au niveau de la culture sur une distance de 5 à 20 H, selon sa porosité. Les travaux de (Campi *et al.*, 2009) réalisés en contexte méditerranéen, ont montré qu'un brise vent induisait une légère augmentation de la température (de 1 à 2°C jusqu'à 4,7H) et de l'humidité de l'air (3% de plus à 4,7H qu'à 12,7H), ce qui peut réduire l'évapotranspiration de la culture (figure 10). A l'inverse, en zone de turbulence les transferts de vapeur d'eau sont augmentés entre les plantes et l'atmosphère en raison d'une vitesse accrue du vent (Cleugh, 1998). Cependant, d'autres facteurs ont des effets sur l'évapotranspiration de la vigne, comme la résistance stomatique, la ressource en eau disponible et accessible pour la plante, ce qui rend la caractérisation de l'effet des arbres sur l'évapotranspiration d'une culture d'autant plus complexe. Une étude menée dans le Sud-Ouest de l'Afrique du Sud, a montré que l'effet brise vent des haies ou des alignements d'arbres avait également pour conséquence de maintenir une conductance stomatique élevée, en augmentant l'ouverture des stomates ainsi que la surface foliaire des vignes (Penaar, 2005).

L'implantation d'aménagements agroforestiers dans une parcelle de vigne peut générer de la compétition pour la ressource, qui va être plus ou moins élevée selon différents paramètres (la distance entre la culture et les arbres, la densité de plantation, les espèces sélectionnées). Par exemple, les travaux menés sur le domaine de Restinclières (34) entre 2008 et 2012 ont montré que la compétition pour l'azote pouvait être importante entre les arbres et la vigne, d'autant plus lorsque que la densité d'arbres à l'hectare est très élevée (1 rang d'arbres tous les 4 rangs de vigne) [4].

Une compétition pour l'eau entre les arbres et la vigne peut également induire un stress hydrique pour la vigne. Un stress hydrique excessif impacte négativement la photosynthèse, en raison à la fois de la réduction de la surface foliaire et de l'induction de la fermeture des stomates, ce qui entraîne une baisse du niveau de sucres des baies (Gómez-del-Campo *et al.*, 2002). En revanche, un stress hydrique modéré est bénéfique pour la vigne. Il permet de ralentir la croissance végétative et ainsi de limiter la propagation de maladies fongiques (Smart and Robinson, 1991) et également d'augmenter la concentration en sucres, en anthocyanes, en phénols et en tanins dans les baies, ce qui va permettre d'améliorer la qualité du vin.

L'état hydrique* de la vigne peut être estimé notamment en mesurant son potentiel hydrique à l'aide d'une chambre à pression (chambre de Scholander). Cette méthode, qui est la méthode de référence, permet d'estimer la capacité des cellules à retenir l'eau : moins il y a d'eau libre dans la plante, plus la pression nécessaire pour extraire la sève de la feuille sera forte (Scholander *et al.*, 1965). Le potentiel hydrique foliaire peut être mesuré à heures différentes selon les objectifs. En fin de nuit, la tension de sève dans le végétal est considérée comme étant en équilibre avec le potentiel hydrique du sol proche des racines. Si la chambre à pression est utilisée à ce moment-là, alors la mesure permettra d'évaluer la disponibilité en eau du sol : c'est le potentiel hydrique de base (phb). En revanche, la mesure du potentiel hydrique en journée renseigne sur la pression qui doit être générée par la plante pour puiser l'eau du sol puis la libérer dans l'atmosphère par transpiration : c'est le potentiel hydrique de feuille (phf). Cette mesure donne une estimation de l'état hydrique du végétal en conditions de transpiration (Scholander *et al.*, 1965).

Enfin, sachant que les aménagements agroforestiers ont tendance à créer une zone légèrement plus humide et plus chaude en aval du brise vent (Campi *et al.*, 2009) et que ces facteurs sont propices au développement d'agents pathogènes comme l'oomycète* *Plasmopara viticola* responsable du mildiou et le mycète *Elsinoë ampelina* responsable de l'anthracnose (Thind *et al.*, 2004), nous pouvons supposer que la vigne peut être soumise à une plus forte pression de certaines maladies fongiques dans ces zones-là.

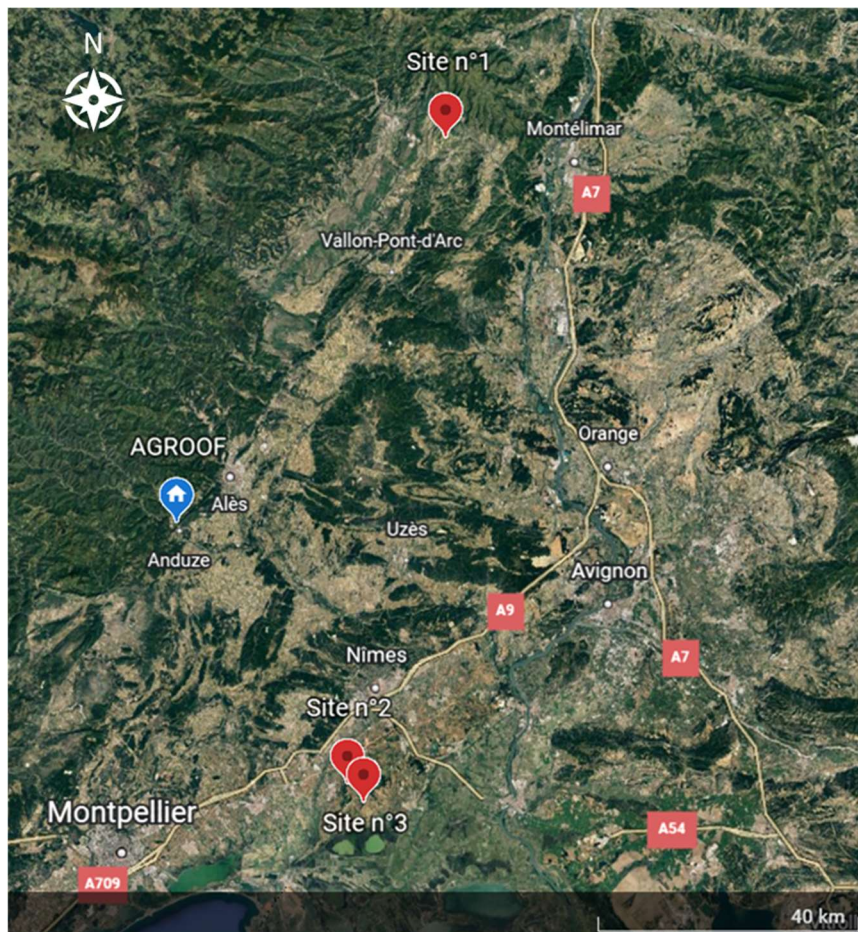


Figure 11 : Localisation des trois parcelles suivies. La première parcelle se situe en Ardèche (07) et les deux autres dans les costières de Nîmes (30).

1.5 Hypothèses posées

Peu de travaux ont été menés sur les systèmes agroforestiers, mais tous soulignent que les arbres modifient leur microclimat environnant. Cela peut avoir des effets sur la vigne située à proximité, au niveau des stress thermique et hydrique causés par les fortes chaleurs et le manque d'eau, ou encore au niveau de la pression maladies fongiques. D'après ces informations, nous pouvons nous demander dans quelle mesure les aménagements agroforestiers, du fait de la modification du microclimat, influencent la croissance et le développement des vignes en contexte méditerranéen.

Trois hypothèses peuvent ainsi être émises sur le comportement des vignes en agroforesterie :

- Les aménagements agroforestiers peuvent avoir un effet sur le développement de certains pathogènes fongiques ;
- Les aménagements agroforestiers peuvent impacter la croissance végétative de la vigne, d'autant plus lorsque la culture est proche des arbres ;
- L'état hydrique de la vigne varie selon la distance qui la sépare des arbres.

En mettant en relation les conditions du microclimat (température, humidité et rayonnement) avec les données mesurées sur la vigne (croissance, état hydrique, état sanitaire) l'objectif est de tester ces hypothèses en climat méditerranéen pour mieux connaître les interactions entre la vigne et les arbres et ainsi mieux accompagner les viticulteurs dans la mise en place de leurs projets agroforestiers.

2. Matériel et méthode

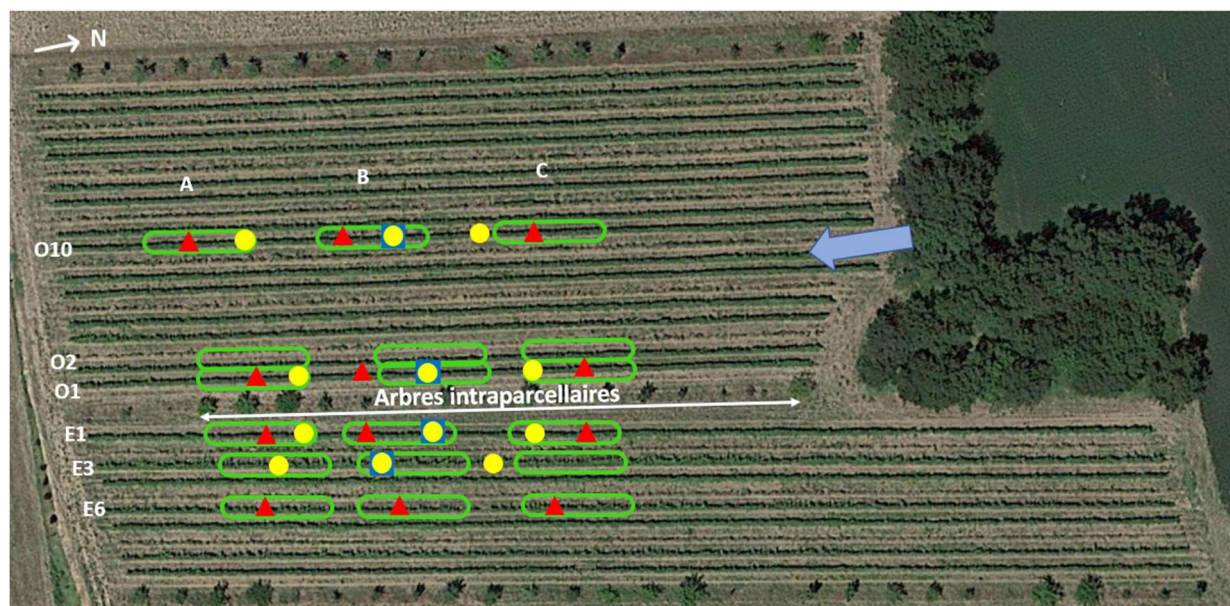
2.1 Sites expérimentaux

Trois sites expérimentaux situés en climat méditerranéen ont été suivis du mois d'avril au mois de juillet 2022 : une parcelle en agroforesterie intraparcellaire sur le site n°1 en Ardèche, ainsi que deux parcelles avec des haies dans les costières de Nîmes sur les sites n°2 et n°3 (figure 11). Dans chaque parcelle, différentes modalités sont déterminées en fonction de plusieurs paramètres : la distance entre le rang de vigne suivi et l'aménagement agroforestier, l'orientation du rang de vigne par rapport aux arbres et le type d'aménagement agroforestier.

2.1.1 Site n°1

2.1.1.1 Caractéristiques de la parcelle

Sur le site n°1, la vigne a été plantée en 2012 avec un écartement de 2,3 m entre les rangs et de 1 m sur le rang, après un sous-solage croisé à 40 cm de profondeur. Le Syrah est cultivé en agriculture biologique, conduit en guyot simple, palissé et rogné à 1,85 m. La vigne n'est pas irriguée. Un couvert végétal est semé entre les rangs et la gestion de l'enherbement sous le rang se fait grâce au travail du sol.



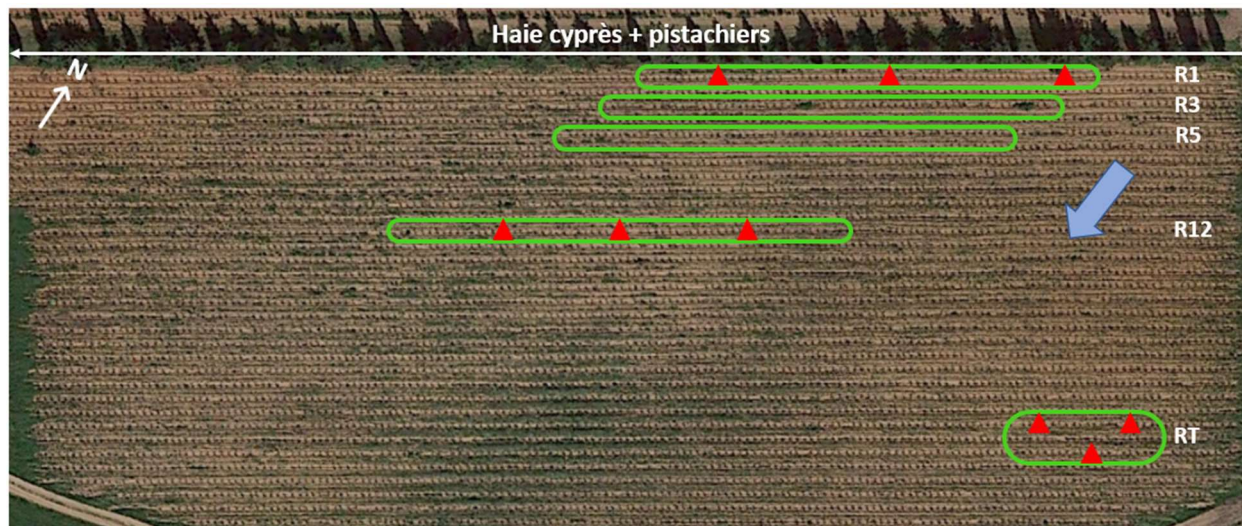
Légende :

- ▲ Sonde de température et d'hygrométrie

● Capteur PAR
- ➡ Direction du vent dominant

○ Zone d'observation
- Tensiomètres

Figure 12 : Dispositif expérimental du site n°1. Les observations sont réalisées selon six modalités (O10 ; O2 ; O1 ; E1 ; E3 et E6) et trois répétitions (A ; B et C) en fonction de la distance et de l'orientation par rapport à l'alignement d'arbres central.



Légende :

- ▲ Sonde de température et d'hygrométrie
- ➡ Direction du vent dominant
- Zone d'observation

Figure 13 : Dispositif expérimental du site n°2. Les observations sont réalisées selon cinq modalités (R1 ; R3 ; R5 ; R12 et RT) en fonction de la distance à la haie brise-vent.

Les alignements d'arbres intraparcellaires ont été plantés en même temps que la vigne, en orientation Nord-Sud. Les vents dominants viennent du Nord [5], l'alignement d'arbres n'a donc pas d'effet brise vent. Les arbres implantés sont des muriers, des amandiers ainsi que différents arbres fruitiers, à une distance de 4 m des rangs de vigne. L'aménagement fait en moyenne 4,5 m de haut sur 3 m de large. Une bande enherbée, à enherbement spontané et fauchée une fois par an, est présente sous les arbres.

2.1.1.2 Dispositif expérimental

Les placettes d'observation ont été disposées de part et d'autre de l'alignement d'arbres, sur les rangs 1 ; 3 et 6 côté Est (modalités E1, E3, E6) et 1 ; 2 et 10 côté Ouest (modalités O1, O2, O10) (figure 12). Le rang 2 a été choisi côté Est car les ceps du rang 3 sont morts précocement à cause d'une incompatibilité entre le cépage et le porte greffe. Le rang 10 côté Ouest (O10) sert de témoin. L'intérêt de suivre des rangs de part et d'autre de l'alignement d'arbres est de voir s'il existe un effet différent des arbres sur la vigne selon l'orientation par rapport aux arbres. 3 répétitions (A ; B et C) de 5 ceps consécutifs ont été déterminés pour chaque modalité, ce qui représente un total de 15 ceps suivis par modalité.

2.1.2 Site n°2

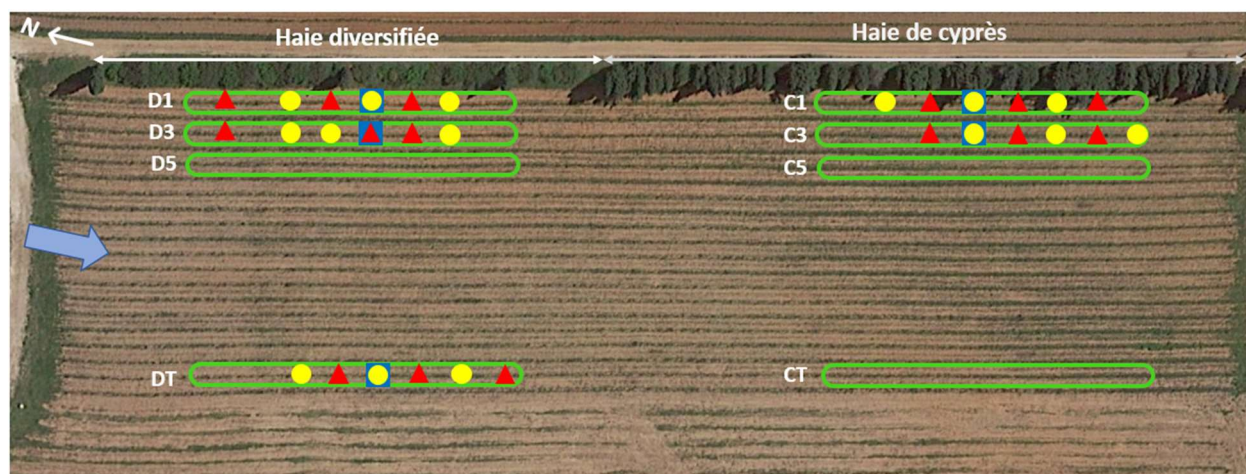
2.1.2.1 Caractéristiques de la parcelle

Sur le site n°2 orienté Est-Ouest, la vigne a été plantée en 1998. Le Mourvèdre est taillé en gobelet et n'est pas rogné, ni irrigué. La gestion de l'enherbement se fait par le travail du sol sous le rang et dans l'inter-rang. Le sol de la parcelle est composé de galets roulés sur une terre argilo-calcaire, caractéristique des costières de Nîmes.

La haie a été implantée en bordure, côté Nord de la parcelle, en même temps que la vigne. Elle a une fonction de brise-vent des vents du Nord [5]. Elle est essentiellement composée de cyprès de Provence et de pistachiers térébinthes alternés, mesure en moyenne 8 m de haut sur 3 m de large, et est implantée à 3 m du premier rang de vigne.

2.1.2.2 Dispositif expérimental

D'après son rôle brise-vent, les modalités ont été déterminées au regard des différentes zones d'influence possibles de ce type de haie d'après la bibliographie. Ainsi, 5 modalités ont été identifiées : les rangs 1 ; 3 et 5 (zone potentielle de compétition avec un effet de gradient possible) (modalités R1, R3, R5) ; le rang 12 (zone potentiellement abritée) (modalité R12), ainsi qu'une modalité témoin (potentiellement en dehors de la zone de protection fournie par la haie) (modalité RT) (figure 13). 15 ceps non isolés ont été suivis par modalité. Ils ont été placés à l'Est de la parcelle, de façon à éviter d'éventuels biais causés par la cuvette située au milieu de la parcelle.



Légende :

- ▲ Sonde de température et d'hygrométrie
- Capteur PAR
- Tensiomètres
- ➡ Direction du vent dominant
- Zone d'observation

Figure 14 : Dispositif expérimental du site n°3. Les observations sont réalisées selon huit modalités (D1, D3, D5, DT, C1, C3, C5 et CT) en fonction de la distance et du type de haie (diversifiée ou cyprès).



Figure 15 : Sonde VOLTcraft DL-121TH sous abris. Cette sonde permet de suivre en continue la température et l'humidité de l'air.

2.1.3 Site n°3

2.1.3.1 Caractéristiques de la parcelle

Le site n°3 est implanté en Syrah depuis 1988, conduit en cordon de Royat, palissé à 1,85 m sans rognage ni irrigation. Le sol est travaillé sous le rang et l'enherbement spontané est fauché dans l'inter-rang. Cette parcelle se situant également dans les costières de Nîmes, nous retrouvons le même type de sol que celui de la parcelle n°2, c'est-à-dire des galets roulés sur un sol argilo-calcaire peu profond (environ 60 cm). La parcelle est orientée Nord-Sud. Les vents dominants viennent du Nord [\[5\]](#), la haie implantée à l'Est de la parcelle n'a donc pas d'effet brise vent.

Deux types de haies, plantées en 2012, sont suivies : une haie diversifiée et une haie de cyprès de Provence. La haie diversifiée est composée de cyprès de Provence, de cornouillers, de pistachiers lentisques, d'alaternes, de lauriers-tins, d'églantiers et de genêts épineux. Elle mesure en moyenne 2,5 m de haut sur 4 m de large. La haie de cyprès mesure 10 m de haut sur 3 m de large. Le premier rang de vigne est planté à 4 m de la haie. L'intérêt de suivre cette parcelle est que nous allons pouvoir comparer l'effet de ces deux types de haies sur le comportement de la vigne.

2.1.3.2 Dispositif expérimental

8 modalités sont suivies sur cette parcelle en fonction de 4 distances à la haie : rangs 1 ; 3 ; 5 et 19 (témoin), et des 2 types de haies (modalités D1, D3, D5, DT pour la haie diversifiée et modalités C1, C3, C5, CT pour la haie de cyprès) (figure 14). En raison d'une mortalité élevée des ceps de vignes (40%), dans certains cas seulement 6 ceps ont été échantillonnés par modalité.

2.2 Caractérisation du microclimat et de l'état hydrique du sol

Plusieurs paramètres destinés à caractériser le microclimat des parcelles ont été mesurés dans certaines des différentes modalités précédemment évoquées : la température (T) et l'humidité relative (RH) de l'air, le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) ainsi que l'état hydrique du sol.

2.2.1 Caractérisation de la température et de l'humidité relative de l'air

Les données de T et HR ont été mesurées à l'aide de sondes VOLTcraft DL-121TH (résolution : 1°C et 0,1 % RH), toutes les 10 minutes sur l'ensemble de la période de l'étude. Sur les 3 sites expérimentaux, des sondes de température et d'humidité ont été installées sous abris (figure 15) pour mesurer la température de l'air à l'ombre, juste au-dessus de la canopée des vignes (à environ 1,80 m du sol), à différentes distances des arbres (figures 12, 13 et 14).

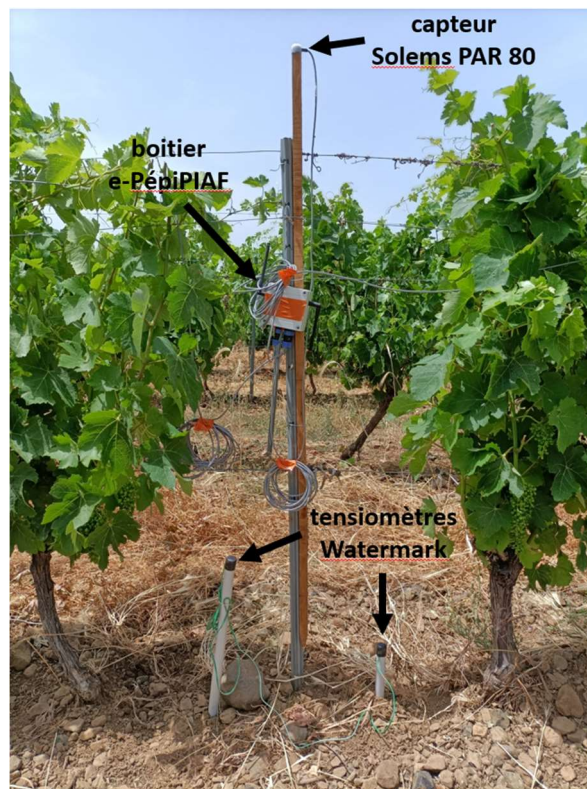


Figure 16 : Boitier e-PépiPIAF connecté à un capteur Solems PAR 80 et à deux tensiomètres Watermark. Le boitier permet d'enregistrer et de transférer les données enregistrées par les trois capteurs Solems PAR 80 ainsi que les deux tensiomètres Watermark connectés.



Figure 17 : Chambre à pression. Utilisation de la chambre à pression pour mesurer le potentiel hydrique foliaire (au midi solaire).

2.2.2 Caractérisation du rayonnement photosynthétiquement actif

Le PAR a été mesuré à l'aide de capteurs Solems PAR 80 (résolution : 6,25 nanomoles) reliés à des boîtiers e-PEPIPIAF (figure 16). Les données ont été enregistrées toutes les 10 minutes, sur l'ensemble de la période de l'étude. Les données obtenues sont récupérées grâce au logiciel DataPIAF.

Des capteurs PAR ont été installés sur les sites n°1 et n°3, à raison de trois capteurs (3 répétitions) par modalité. Ils ont été placés au-dessus de la canopée des vignes (soit à environ 1,90 m du sol), afin de capter la totalité du rayonnement. Sur le site n°1, les rangs O1 ; O10 ; E1 et E3 ont été équipés de capteurs afin de tenter de mettre en avant des différences d'ombrage selon l'orientation par rapport à l'alignement d'arbres (figure 12). Sur le site n°3, les rangs 1 ; 3 et 19 ont été équipés de capteurs. Six capteurs ont été positionnés sur les rangs 1 et 3, à raison de trois capteurs en face de chaque type de haie et trois sur le rang 19 qui servira de témoin (figure 14). Le site n°2 n'a pas été équipé par manque de matériel.

2.2.3 Caractérisation de l'état hydrique du sol

L'état hydrique du sol est mesuré selon deux méthodes : en utilisant des tensiomètres électriques et en utilisant une chambre à pression. Les tensiomètres électriques Watermark, connectés aux boîtiers e-PépiPIAF (figure 16), permettent de mesurer la tension du sol* entre 0 et 240 centibars. Une valeur proche de 0 cbars est caractéristique d'un sol saturé en eau, alors qu'une valeur supérieure à 100 cbars nous indique que la réserve en eau du sol est faible. L'échantillonnage a été réalisé en seulement un point par modalité, avec deux profondeurs (20 cm et 40 cm). Les modalités O10 ; O1 ; E1 et E3 ont été équipées sur le site n°1 (figure 12) et les modalités C1 ; C3 ; D1 ; D3 et DT sur le site n°3 (figure 14). Les sondes sont placées sous le rang de vigne.

Pour mesurer le potentiel hydrique du sol, la chambre à pression (figure 17) est utilisée à partir de 2h du matin jusqu'à l'aube, sur 3 feuilles par placettes (soit 9 feuilles par modalité), prélevées sur 3 ceps indemnes de maladies du bois et avec une expression végétative identique. La feuille est prélevée juste avant la mesure, en coupant le pétiole au niveau de son insertion sur le rameau en veillant à ne pas écraser les tissus. Il ne doit pas y avoir eu de précipitations au moins 4 jours avant la mesure. La première mesure est effectuée avant l'apparition d'un stress hydrique (fin mai), puis les autres mesures sont faites après la floraison (mi-juin) à des intervalles de 3 semaines. Pour interpréter les résultats de potentiel hydrique de base (phb), l'IFV (Institut Français de la Vigne et du Vin) a défini des seuils de contrainte hydrique, basés sur les travaux de (Choné *et al.*, 2001) [\[6\]](#):

- $\text{phb} < 2 \text{ bars}$: contrainte hydrique absente
- $2 \text{ bars} < \text{phb} < 3 \text{ bars}$: contrainte hydrique faible
- $3 \text{ bars} < \text{phb} < 5 \text{ bars}$: contrainte hydrique faible à modérée
- $5 \text{ bars} < \text{phb} < 8 \text{ bars}$: contrainte hydrique modérée à sévère
- $\text{phb} > 8 \text{ bars}$: contrainte hydrique sévère

Tableau I : Nombre de mesures effectuées pour chaque variable sur les trois sites expérimentaux.

Site	Nombre de modalités	Nombre de ceps suivis (n)	Période de suivi	Nombre de mesures (n=nombre de ceps suivis)				
				Stades phénologiques	Potentiel de base	Potentiel de feuille	Longueur des rameaux	Croissance des apex
n°1	6	90	du 11/04/22 au 12/07/22	4 (n=90)	2 (n=54)	3 (n=60)	1 (n=90)	2 (n=90)
n°2	5	75	du 26/04/22 au 21/07/22	5 (n=75)	-	3 (n=50)	1 (n=75)	3 (n=75)
n°3	8	68	du 29/03/22 au 28/07/22	8 (n=68)	-	2 (n=40)	1 (n=68)	2 (n=68)

2.3 Croissance et développement de la vigne

2.3.1 Suivi phénologique et sanitaire

Un suivi phénologique des vignes a été effectué du mois d'avril au mois de juillet sur les trois parcelles, à intervalles de trois semaines environ (tableau I). Les observations se font sur l'ensemble des ceps identifiés pour l'expérimentation (cf paragraphe 2.1.3.2.). Les mêmes ceps sont observés lors de chaque passage, en notant le stade de développement majoritaire de chaque cep. L'échelle BBCH des stades phénologiques de la vigne, a été utilisée (Lorenz et al, 1995) (Annexe I).

Un suivi sanitaire est également effectué de la floraison jusqu'à la véraison. Ce sont les symptômes de mildiou (oomycète *Plasmopara viticola*) et d'oïdium (ascomycète *Uncinula necator*) qui sont recherchés car ce sont les deux pathogènes principaux de la vigne. Les notations sont réalisées sur les ceps dont nous suivons la phénologie, en observant 10 feuilles ou 10 grappes par cep. La fréquence et l'intensité d'attaque sont mesurées afin d'estimer les dégâts causés par le bioagresseur. La Fréquence d'Attaque Moyenne (FAM) est le rapport entre le nombre d'organes atteints (feuilles ou grappes) et le nombre d'organes observés. L'Intensité d'Attaque Moyenne (IAM) est le rapport entre la surface occupée par la maladie (les symptômes) et la surface de tous les organes observés. Ici, l'intensité des dégâts est estimée grâce à l'échelle d'intensité fournie par le Guide de l'observateur.

2.3.2 Suivi de croissance

Pour caractériser la croissance végétative de la vigne, deux méthodes sont utilisées : la mesure de tous les rameaux d'un cep à un instant t ainsi que la méthode des apex. Concernant la mesure de tous les rameaux d'un cep, elle a été effectuée une fois sur chaque parcelle suivie pour connaître la vigueur des ceps de vigne à un instant t, entre le 18 et le 31 mai 2022 afin que la vigne soit suffisamment développée. L'ensemble des rameaux de chaque cep suivi a été mesuré (tableau I).

La méthode des apex, développée par l'IFV [\[7\]](#), est basée sur l'observation de l'extrémité des rameaux. Elle consiste à classer les apex observés selon trois catégories :

- Apex en pleine croissance (stade P) : lorsque l'on replie les deux dernières feuilles étalées le long du rameau, celles-ci ne recouvrent pas l'apex
- Apex en croissance ralentie (stade R) : lorsque l'on replie les deux dernières feuilles étalées le long du rameau, celles-ci recouvrent l'apex
- Apex en arrêt de croissance (stade C) : l'apex est coupé ou sec

Un indice de croissance des apex (IA) est ensuite calculé pour chaque cep :

$$IA = (2 \times nP + nR + 0 \times nC) / n$$

Avec : nP = nombre d'apex en pleine croissance

nR = nombre d'apex en croissance ralentie

nC = nombre d'apex en arrêt de croissance

n = nombre total d'apex observés

La moyenne des IA est ensuite effectuée pour chaque modalité. Cet indice varie entre 0 et 2. Plus la valeur de l'indice est proche de 2, plus la croissance végétative est élevée sur cette modalité. Cette méthode est utilisée pour suivre la croissance de la vigne après la floraison. 10 apex sont observés sur chaque cep (dans la mesure du possible), environ toutes les trois semaines afin de caractériser assez finement la dynamique de croissance.

2.3.3 Suivi de l'état hydrique de la vigne

L'état hydrique des plantes a été évalué par la mesure du potentiel hydrique foliaire (phf) à l'aide d'une chambre à pression. Les mesures se font autour du midi solaire (14h en été en France), sur 3 à 5 feuilles par placette (soit 9 à 15 feuilles par modalités), prélevées sur 3 à 5 ceps indemnes de maladies du bois et avec une expression végétative identique. Les feuilles sélectionnées doivent être exposées côté Sud des ceps et situées au niveau de la partie haute de la canopée. Elles sont prélevées juste avant la mesure, en coupant le pétiole au niveau de l'insertion sur le rameau, en veillant à ne pas écraser les tissus. Il ne doit pas y avoir eu de précipitations au moins 4 jours avant la mesure. La première mesure est effectuée avant l'apparition d'un stress hydrique (fin mai), puis les autres mesures sont faites après la floraison (mi-juin), pour suivre le potentiel hydrique de la vigne tout au long du développement du raisin (tableau I).

L'IFV a défini des seuils de contrainte hydrique en se basant sur les travaux de (Choné *et al.*, 2001) afin d'interpréter les données de phf [\[8\]](#) :

- $\text{phf} < 9 \text{ bar}$: contrainte hydrique absente
- $9 \text{ bars} < \text{phf} < 11 \text{ bars}$: contrainte hydrique faible
- $11 \text{ bars} < \text{phf} < 13 \text{ bars}$: contrainte hydrique faible à modérée
- $13 \text{ bars} < \text{phf} < 14 \text{ bars}$: contrainte hydrique modérée à sévère
- $\text{phf} > 14 \text{ bars}$: contrainte hydrique sévère

2.4 Traitement statistique

Les conditions d'application de tests paramétriques ont été contrôlées. La normalité des variables a été vérifiée grâce au test de Shapiro-Wilk, avec un risque α fixé à 0,05. L'homogénéité des variances a été vérifiée grâce au test du Khi^2 de Bartlett, avec un risque α fixé à 0,05. Les variables pour lesquelles des p-values $> 0,05$ ont été obtenues pour ces deux tests, respectent les conditions d'application de tests paramétriques (Annexe II). Dans ce cas, un test ANOVA à 1 facteur ($\alpha = 5\%$) suivi d'un test de Tukey ont été effectués, afin de déterminer les différences significatives entre les moyennes des groupes. Dans le cas contraire, un test de Kruskal-Wallis suivi d'un test de Dunn ont été effectués (tests non paramétriques), afin de mettre en avant les différences significatives entre les groupes.

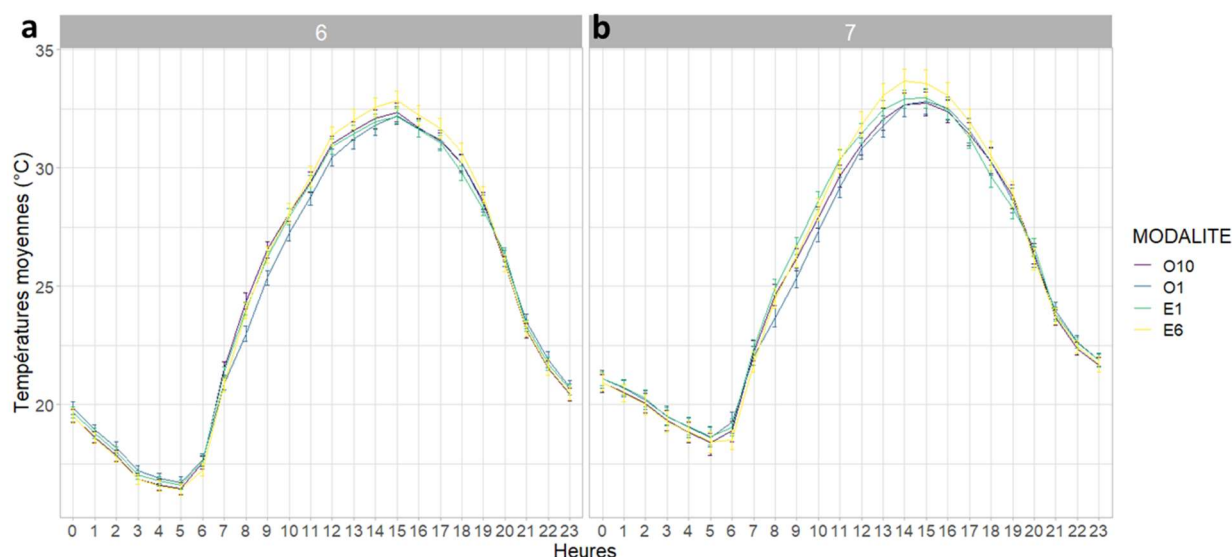


Figure 18 : Températures journalières moyennes sur le site n°1. Valeurs moyennes par heure des températures de l'air journalières pour les mois de juin (a) et juillet (b), en fonction de la distance et de l'exposition des rangs de vigne à l'alignement d'arbres.

Tableau II : Ecart de température et d'humidité entre les modalités et le témoin. Valeurs moyennes horaires par mois de la température et de l'humidité de l'air.

Site	Modalité	Mois	Heure	T° moyenne (°C)	ΔT° (°C)	HR moyenne (RH)	ΔHR (RH)
1	O1	juin	8h	23,0±0,2		56,7±0,7	
1	O10	juin	8h	24,4±0,2	-1,4	52,9±0,7	+3,8
1	E1	juillet	18h	29,7±0,2		31,7±1,0	
1	O10	juillet	18h	30,3±0,3	-0,6	30,9±1,0	+0,8
2	R1	avril	14h	26,5±0,3		32,0±1,0	
2	RT	avril	14h	25,3±0,2	+1,2	35,6±0,9	-3,6
2	R12	avril	14h	26,1±0,2		36,8±0,9	
2	RT	avril	14h	25,3±0,2	+0,9	35,6±0,9	+1,2
2	R1	avril	18h	20,0±0,1		51,4±1,2	
2	RT	avril	18h	21,7±0,1	-1,7	47,3±0,8	+4,1
2	R1	juin	14h	33,5±0,2		31,0±0,8	
2	RT	juin	14h	33,0±0,2	+0,5	34,2±0,6	-3,2
2	R12	juin	14h	33,8±0,2		34,6±0,6	
2	RT	juin	14h	33,0±0,2	+0,8	34,2±0,6	+0,4
2	R1	juin	18h	28,6±0,1		41,4±0,8	
2	RT	juin	18h	30,7±0,1	-2,1	38,6±0,6	+2,8
3	C1	mai	10h	22,2±0,1		52,9±0,5	
3	T	mai	10h	23,4±0,1	-1,2	49,2±0,7	+3,7
3	C1	mai	14h	28,8±0,1		36,1±0,4	
3	T	mai	14h	27,2±0,1	+1,6	40,6±0,6	-4,5
3	D1	mai	14h	28,1±0,1		38,6±0,6	
3	T	mai	14h	27,2±0,1	+0,9	40,6±0,6	-2,0
3	C1	juillet	10h	29,1±0,1		41,4±0,6	
3	T	juillet	10h	31,0±0,1	-1,9	38,5±0,6	+2,9
3	C1	juillet	14h	37,1±0,1		27,4±0,5	
3	T	juillet	14h	36,0±0,1	+1,1	31,3±0,7	-3,9
3	D1	juillet	14h	36,5±0,1		28,9±0,6	
3	T	juillet	14h	36,0±0,1	+0,5	31,3±0,7	-2,4

3. Résultats

3.1 Caractérisation du microclimat et de l'état hydrique du sol

3.1.1 Caractérisation de la température et de l'humidité relative de l'air

Sur le site n°1, des légères différences de températures de l'air sont observées à certaines heures de la journée entre les modalités (figure 18). En moyenne sur le mois de juin, les sondes placées sur le premier rang côté Ouest de l'aménagement arboré (O1) ont enregistré une température de 23°C à 8h, soit 1,4°C de moins que la température enregistrée sur le rang témoin (O10) (tableau II). Cet écart de température diminue avant de s'annuler aux alentours de midi (figure 18a).

Côté Est de l'alignement d'arbres, c'est à 18h que la différence de température est la plus élevée entre le premier rang (E1) et la modalité témoin (figure 18b). A cette heure-là, l'écart de température moyen sur le mois de juillet est de 0,6°C entre les deux modalités, avec une température plus faible à proximité des arbres (tableau II).

Pour le site n°2, une légère augmentation de la température moyenne est mesurée à 14h en se rapprochant de la haie. Au mois d'avril, la température est supérieure de 0,9°C sur le rang 12 (R12) et de 1,2°C sur le rang 1 (R1) par rapport au rang témoin (RT) (tableau II). Au mois de juin, ce gradient de température n'est plus visible, même si en moyenne à 14h la température est plus élevée de 0,5°C et de 0,8°C respectivement sur les rangs 1 et 12 par rapport au témoin. A l'inverse, à 18h, la température de l'air est plus faible proche de la haie : moins 1,7°C sur le rang 1 par rapport au rang témoin en avril (tableau II). Au mois de juin cette différence de température entre les deux modalités est plus importante (2,1°C).

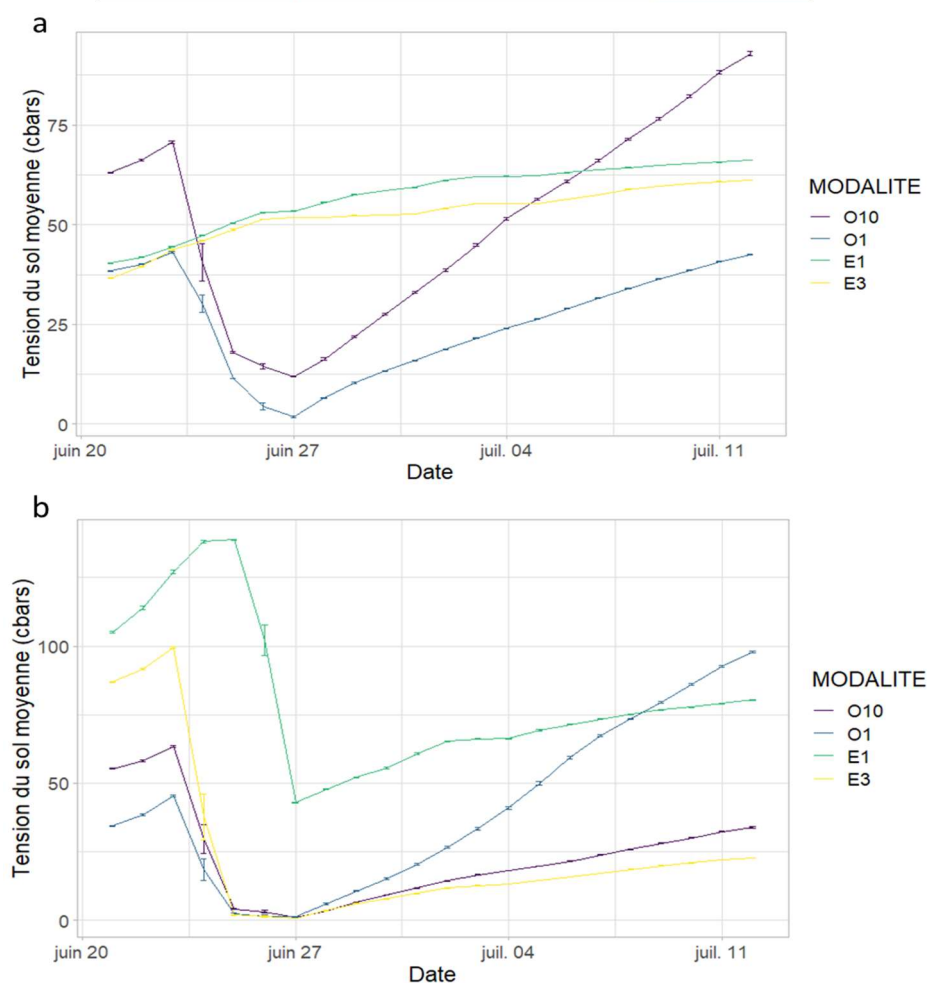
Enfin, concernant le site n°3, des différences de températures de l'air sont observées à certaines heures de la journée en fonction de la distance et du type de haie. Au mois de mai, à 10h, une baisse de température de 1,2°C est mesurée sur le premier rang côté haie de cyprès (C1) par rapport rang témoin (T) (tableau II). Cette différence de température proche de la haie de cyprès est plus importante au mois de juillet à la même heure (-1,9°C).

En revanche, en moyenne sur le mois de mai à 14h, la température est plus élevée de 1,6°C proche de la haie de cyprès et de 0,9°C proche de la haie diversifiée par rapport au témoin. Pour le mois de juillet, cette différence de température à proximité des deux types de haies est plus faible : +1,1°C côté haie de cyprès et +0,5°C côté haie diversifiée par rapport au témoin (tableau II).

De manière générale, l'humidité relative de l'air est inversement corrélée à la température de l'air : dans la majorité des cas, lorsque la température diminue, l'humidité relative de l'air augmente et vice versa (tableau II).

Tableau III : Ecart de valeur de PAR entre les modalités et le témoin. Valeurs moyennes horaires par mois du rayonnement photosynthétiquement actif par rang, selon la distance, l'exposition et le type d'aménagement agroforestier.

Site	Modalité	Mois	Heure	PAR moyen (μmol)	Δ PAR (μmol)
1	O1	juillet	7h	83,3 \pm 2,9	
1	O10	juillet	7h	213,6 \pm 7,0	-130,3
1	O1	juillet	9h	200,8 \pm 10,7	
1	O10	juillet	9h	688,8 \pm 14,6	-488,0
1	O1	juillet	10h	261,3 \pm 14,2	
1	O10	juillet	10h	954,9 \pm 13,4	-693,6
1	O1	juillet	11h	990,0 \pm 37,5	
1	O10	juillet	11h	1176,7 \pm 7,1	-186,7
3	C1	juillet	7h	57,7 \pm 0,7	
3	T	juillet	7h	176,2 \pm 3,5	-118,7
3	C3	juillet	7h	70,7 \pm 0,8	
3	T	juillet	7h	176,2 \pm 3,5	-105,5
3	C1	juillet	9h	150,2 \pm 5,5	
3	T	juillet	9h	685,3 \pm 5,0	-535,1
3	C3	juillet	9h	327,6 \pm 9,1	
3	T	juillet	9h	685,3 \pm 5,0	-357,7
3	C1	juillet	11h	767,5 \pm 18,2	
3	T	juillet	11h	1058,4 \pm 11,2	-290,9
3	C3	juillet	11h	1109,4 \pm 5,6	
3	T	juillet	11h	1058,4 \pm 11,2	+51,0



3.1.2 Caractérisation du rayonnement photosynthétiquement actif

Sur le site n°1, on remarque que le matin, l'intensité du rayonnement photosynthétiquement actif est négativement impactée par la présence des arbres côté Ouest de l'aménagement agroforestier. Le PAR est plus faible sur la modalité O1 par rapport à la modalité O10 (témoin) dès le lever du soleil ($-130,3 \mu\text{mol}$ à 7h) (tableau III). La différence de rayonnement entre les deux modalités augmente jusqu'à 10h ($-693,6 \mu\text{mol}$), puis diminue et devient nulle à partir de 12h. Aucune différence notable de l'intensité du PAR n'est observée côté Est de l'alignement d'arbres par rapport au témoin.

Sur la parcelle n°3 on observe également que le matin l'intensité du rayonnement photosynthétiquement actif est négativement impactée par la présence des arbres, dans la partie haie de cyprès mais pas dans la partie haie diversifiée. Le PAR est plus faible, principalement pour la modalité C1, mais également pour la modalité C3, par rapport à la modalité témoin dès le lever du soleil ($-118,7 \mu\text{mol}$ pour C1 et $-105,5 \mu\text{mol}$ pour C3 par rapport au témoin à 7h) (tableau III). La différence de rayonnement entre C1, C3 et T augmente jusqu'à 9h ($-535,1 \mu\text{mol}$ pour C1 et $-357,7 \mu\text{mol}$ pour C3 par rapport au témoin), puis diminue et devient nulle aux alentours de 12h.

3.1.3 Caractérisation de l'état hydrique du sol

Mesure de la tension du sol

Sur le site n°1, côté Ouest de l'aménagement agroforestier (modalités O1 et O10), à 20 cm de profondeur, la tension du sol augmente jusqu'au 23 juin ($T_{O1} = 43,1 \pm 0,1$ cbars ; $T_{O10} = 70,7 \pm 0,1$ cbars) (figure 19a). Les 34 mm de pluie du 24 et 25 juin [9], ont fait chuter la tension du sol à $1,8 \pm 0,1$ cbars pour O1 et $11,9 \pm 0,1$ cbars pour O10 au 27/06/22. A partir de cette date-là et jusqu'à la fin des relevés (12/07/22), aucune autre précipitation n'a eu lieu. Pour ces deux modalités, la tension du sol augmente continuellement (plus rapidement pour O10 que pour O1) jusqu'à atteindre $42,5 \pm 0,1$ cbars pour O1 et $92,9 \pm 0,3$ cbars pour O10 (figure 19a). Côté Est de l'alignement d'arbres (modalités E1 et E3), aucune diminution de la tension du sol n'est observée après la pluie du 24 juin (figure 19a). La tension du sol augmente légèrement de façon constante entre le début et la fin des mesures. Elle passe de $40,4 \pm 0,1$ cbars à $66,2 \pm 0,1$ pour E1 et de $36,6 \pm 0,1$ à $61,2 \pm 0,1$ cbars pour E3.

A 40 cm de profondeur, là aussi la tension du sol augmente pour les quatre modalités jusqu'au 23 juin ($T_{E1} = 127,1 \pm 0,3$ cbars ; $T_{E3} = 99,6 \pm 0,2$ cbars ; $T_{O1} = 45,5 \pm 0,2$ cbars ; $T_{O10} = 63,5 \pm 0,2$ cbars) (figure 19b). Les précipitations des 24 et 25 juin ont fait chuter le potentiel hydrique jusqu'à ce qu'il soit quasiment nul ($T_{E3} = 0,73 \pm 0,04$ cbars ; $T_{O1} = 1,31 \pm 0,1$ cbars ; $T_{O10} = 1,01 \pm 0,03$ cbars) sauf pour le rang E1 ($T_{E1} = 42,9 \pm 0,1$ cbars). Après cette date-là, la tension du sol augmente de façon plus rapide pour la modalité O1 que pour les rangs E1, E3 et O10 (figure 19b).

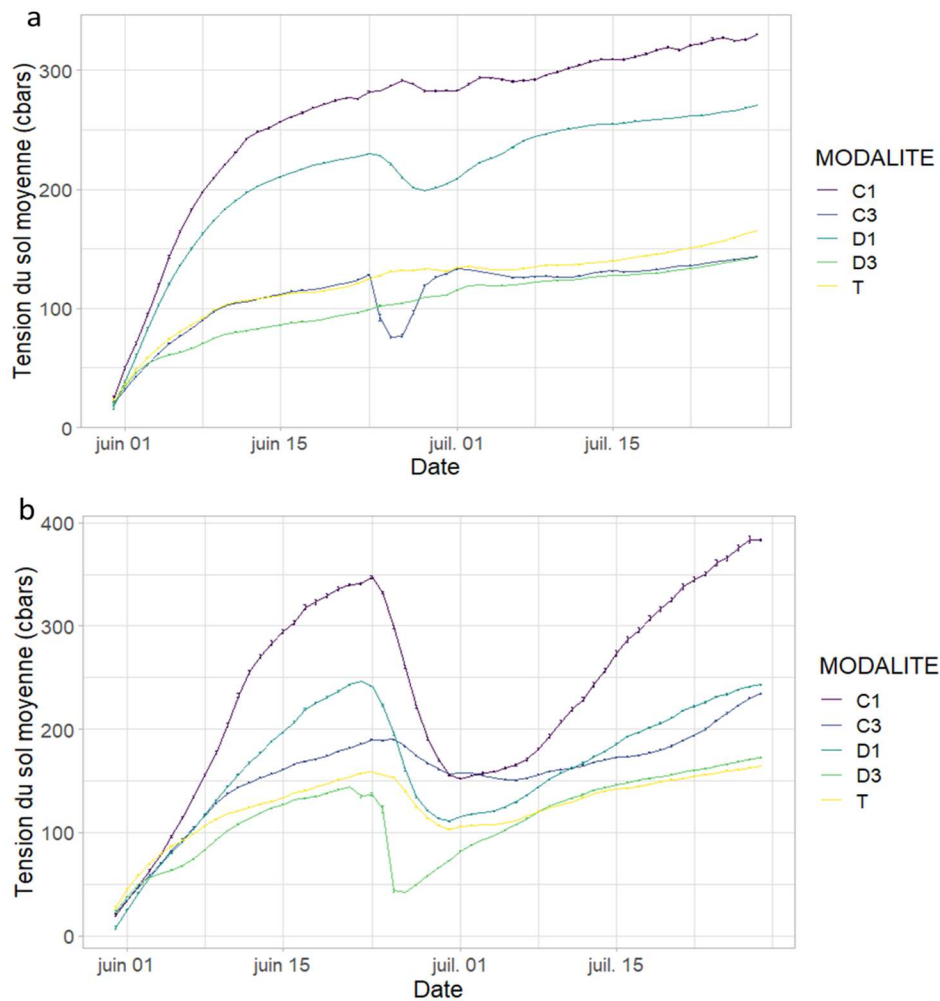


Figure 20 : Tension du sol sur le site n°3. Valeurs journalières moyennes de tension du sol par rang, selon la distance et le type de haie, à 20 cm (a) et à 40 cm (b) de profondeur, du 31/05/22 au 28/07/22.

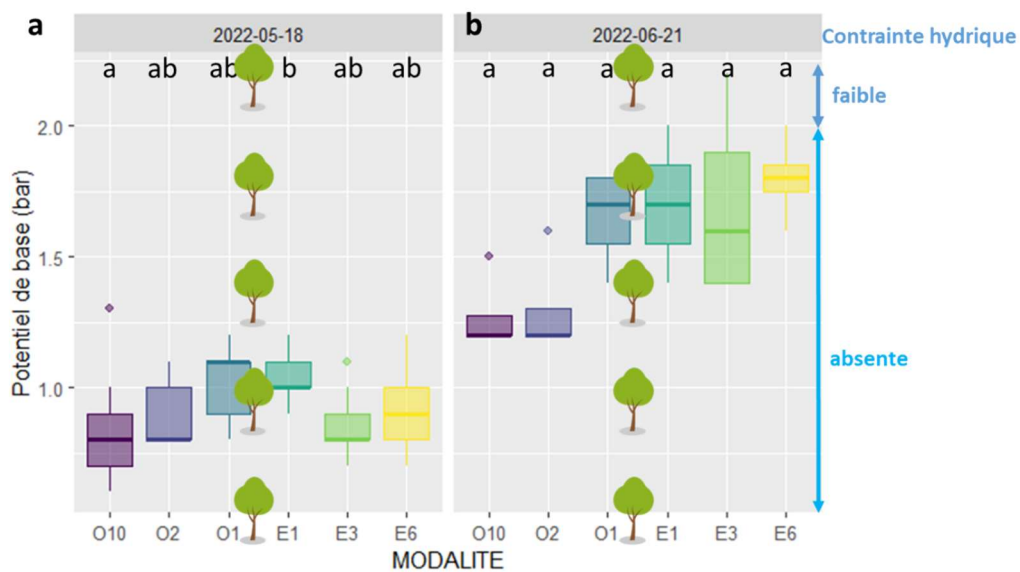


Figure 21 : Potentiel de base moyen sur le site n°1. Valeurs moyennes de potentiel hydrique de base par rang, selon la distance et l'exposition par rapport à l'alignement d'arbres, mesuré au 18/05/22 (a) ($F=2,71$; $df=5$; $p=0,03$) et au 21/06/22 (b) ($F=3,58$; $df=5$; $p=0,02$).

Pour le site n°3, à 20 cm de profondeur, la tension du sol est faible pour toutes les modalités début juin ($T_{\text{moy}} = 20,1$ cbars) (figure 20a). Elle augmente ensuite très rapidement jusqu'au 10 juin, surtout au niveau du rang de vigne le plus proche des haies de cyprès et diversifiée (C1 et D1). Ainsi, au 15 juin, la tension du sol de ces deux modalités est plus de deux fois plus élevée par rapport aux autres modalités. Les 10 mm de pluie tombés entre le 21 et le 24 juin [9], ont légèrement fait diminuer la tension du sol pour les modalités D1 et C3 ($\Delta T_{D1} = -31$ cbars ; $\Delta T_{C3} = -53$ cbars) (figure 20a). Au cours du mois de juillet, la tension du sol a légèrement augmenté de façon constante pour les cinq modalités.

A 40 cm de profondeur, la tension du sol est également faible pour l'ensemble des modalités début juin ($T_{\text{moy}} = 20,1$ cbars) (figure 20b). Elle augmente ensuite jusqu'au 23 juin, plus rapidement au niveau du premier rang côté haie de cyprès (C1) et également légèrement plus rapidement au niveau du premier rang côté haie diversifiée (D1) que pour les autres modalités. Ainsi au 23 juin, la tension du sol vaut : $T_{C1} = 347,3 \pm 0,7$ cbars ; $T_{D1} = 241,7 \pm 0,2$ cbars ; $T_{C3} = 189,9 \pm 0,2$ cbars ; $T_{D3} = 136,7 \pm 0,6$ cbars ; $T_T = 159,0 \pm 0,0$ cbars (figure 20b). Les précipitations des 21 et 24 juin [9] ont fait chuter la tension du sol, davantage pour les modalités C1, D1 et D3 ($\Delta T_{C1} = -195,3$ cbars ; $\Delta T_{D1} = -130,7$ cbars ; $\Delta T_{D3} = -94,4$ cbars) que pour les modalités C3 et témoin ($\Delta T_{C3} = -33,1$ cbars ; $\Delta T_T = -55,8$ cbars). A partir du 01/07/22 jusqu'à la fin des relevés la tension du sol réaugmente davantage pour C1 que pour toutes les autres modalités (au 28/07/22 : $T_{C1} = 383,3 \pm 0,7$ cbars ; $T_T = 164,8 \pm 0,1$ cbars).

Mesure du potentiel de base

Une tendance des valeurs de potentiel hydrique de base à être plus élevées à proximité des arbres intraparcels a été observée sur la parcelle n°1 au 18/05/22, principalement côté Ouest ($\text{phb}_{O1} = 1,1$ bar > $\text{phb}_{O10} = 0,8$ bar) mais aussi côté Est ($\text{phb}_{E1} = 1,0$ bar > $\text{phb}_{O10} = 0,8$ bar) (figure 21a). D'après les seuils de contrainte hydrique définis par l'IFV, la parcelle peut être classée en absence de contrainte hydrique au 18/05/22 ($\text{phb} = 0,9$ bar).

Au 21/06/22, la mesure du potentiel hydrique de base nous indique que la contrainte hydrique est toujours absente sur le site n°1, même si elle a augmenté par rapport à la mesure précédente ($\text{phb} \approx 1,5$ bar) (figure 21b). Le gradient de potentiel hydrique de base est également observé à cette date-là. Aucune différence significative n'est mise en avant entre les modalités, même si le potentiel hydrique de base montre une tendance à être plus élevé à proximité des arbres et côté Est de l'aménagement par rapport au témoin (O10).

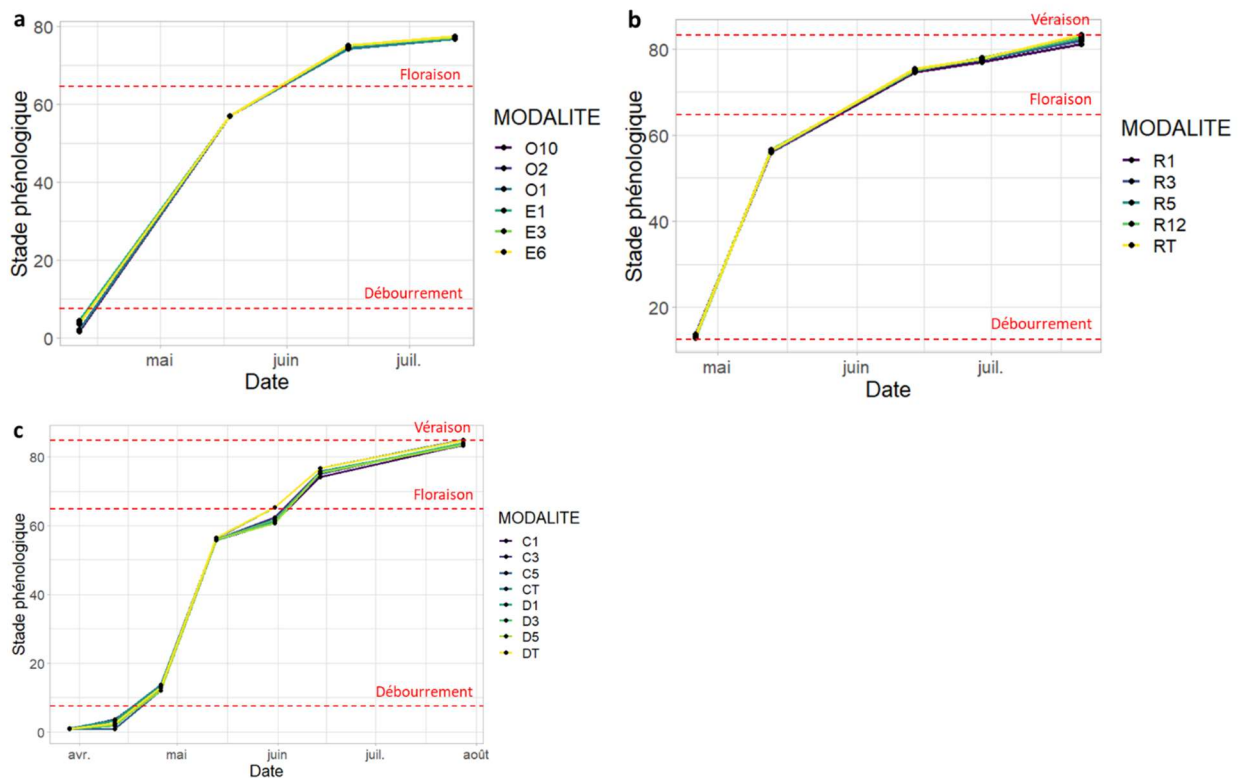


Figure 22 : Evolution des stades phénologiques de la vigne. Les mesures ont été effectuées d'avril à juillet sur les sites n°1 (a) n°2 (b) et n°3 (c).

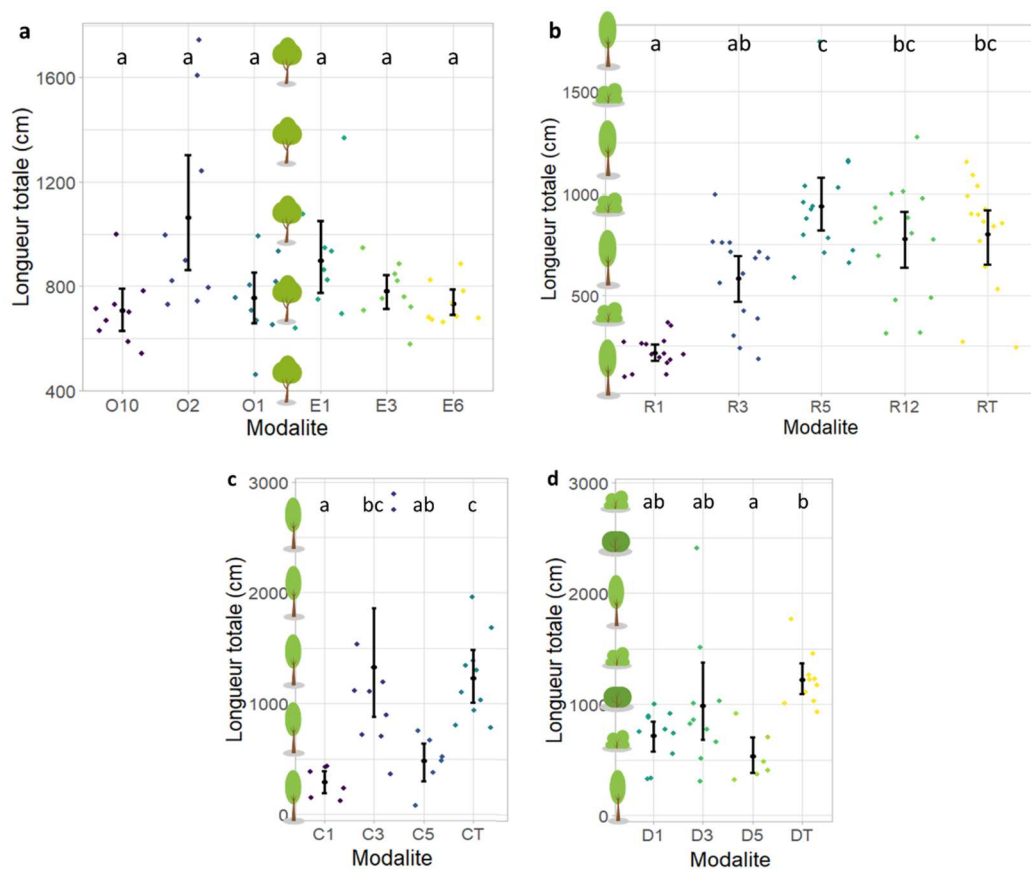


Figure 23 : Longueur totale des rameaux de chaque cep. Valeurs moyennes de longueur de l'ensemble des rameaux d'un cep par rang, selon la distance et l'exposition par rapport à l'aménagement agroforestier pour les sites n°1 (a) (Kruskal-Wallis chi-squared=13,16 ; df=5 ; p=0,02), n°2 (b) (Kruskal-Wallis chi-squared=38,84 ; df=4 ; p=7,53e-8) et n°3 (c et d) (Kruskal-Wallis chi-squared=37,97 ; df=7 ; p=3,07e-6).

3.2 Croissance et développement de la vigne

3.2.1 Suivi phénologique et sanitaire

Concernant la phénologie, aucune différence de précocité ou de retard n'a été observée entre les différentes modalités des trois parcelles. Le débourrement des bourgeons des vignes (stade 09) a eu lieu mi-avril sur les sites n°1 et 3 (figures 22a et 22c). Le suivi ayant débuté plus tard sur le site n°2 (première observation le 26/04/22), le stade de débourrement n'a pas été observé sur ce site (figure 22b). La floraison (stades 60 à 69) a été observée début juin sur les trois parcelles (figure 22). Enfin, la véraison (stade 85) a été observée fin juillet sur les sites n°2 et 3 (figure 22b et 22c). Le suivi ayant été arrêté plus tôt sur le site n°1 (dernière observation le 12/07/22) (tableau I), le stade de véraison n'a pas été observé sur ce site (figure 22a).

Sur l'ensemble des sites, aucun symptôme de mildiou ou d'oidium n'a été observé durant toute la période de suivi. C'est la raison pour laquelle aucun résultat n'est présenté ici.

3.2.2 Suivi de croissance

Mesure de la longueur totale des rameaux

La mesure de la longueur totale des rameaux de chaque cep suivi a été effectuée respectivement les 18/05/22, 20/05/22 et 31/05/22, sur les sites n°1, 2 et 3. Cette mesure n'a pas montré de différences significatives entre les modalités sur le site n°1 (alignement d'arbres intraparcellaires) (figure 23a), même si la longueur totale des rameaux de chaque cep semble être plus élevée pour la modalité O2 que pour la modalité témoin. La différence entre ces deux modalités (O2 et O10) n'est pas significative à cause de la forte variabilité des valeurs de O2.

En revanche, des différences significatives de vigueur entre les modalités des sites n°2 et 3 sont observées (figures 23b, 23c et 23d). Pour le site n°2 (haie de cyprès et de pistachiers), on remarque un gradient de longueur totale des rameaux en fonction de la distance à la haie jusqu'au rang 5 (R5). Les ceps du premier rang (R1) sont significativement moins développés que ceux du rang témoin (RT) (figure 23b).

Concernant le site n°3, les ceps des rangs 1 (C1) et 5 (C5) à proximité de la haie de cyprès sont significativement moins développés que ceux du rang témoin (CT) (figure 23c). A proximité de la haie diversifiée, des résultats similaires sont observés : les ceps des rangs 1 (D1) et 5 (D5) sont moins développés que ceux du rang témoin (DT), seulement la différence de longueur des rameaux n'est significative qu'entre le rang 5 et le rang témoin (figure 23d).

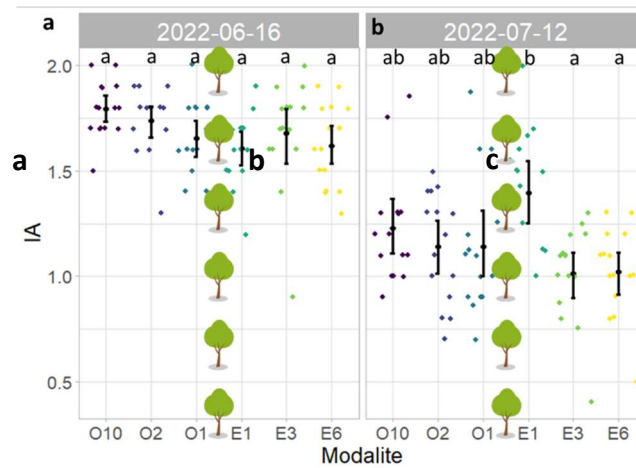


Figure 24 : Indice de croissance des apex pour le site n°1. Valeurs moyennes d'indice de croissance des apex par rang, selon la distance et l'exposition par rapport à l'alignement d'arbres au 16/06/22 (a) (Kruskal-Wallis chi-squared=12,80 ; df=5 ; p=0,03) et au 12/07/22 (b) (F=4,26 ; df=5 ; p=1,68e-3).

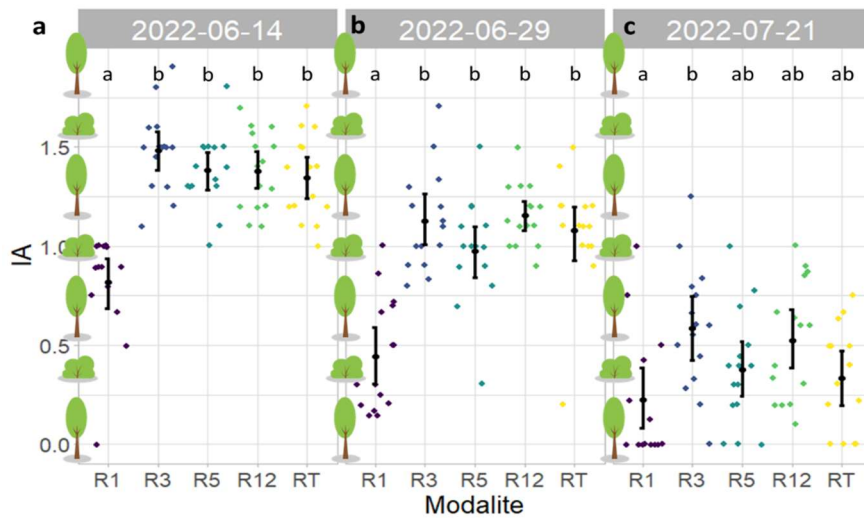


Figure 25 : Indice de croissance des apex pour le site n°2. Valeurs moyennes d'indice de croissance des apex par rang, selon la distance à la haie au 14/06/22 (a) (Kruskal-Wallis chi-squared=37,30 ; df=4 ; p=1,53e-7), au 29/06/22 (b) (Kruskal-Wallis chi-squared=33,70 ; df=4 ; p=8,45e-7) et au 21/07/22 (c) (F=3,59 ; df=4 ; p=0,01).

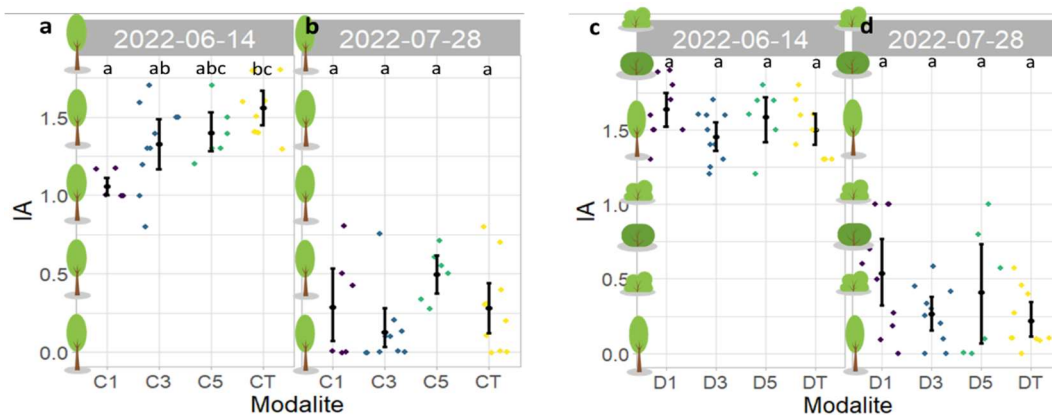


Figure 26 : Indice de croissance des apex pour le site n°3. Valeurs moyennes d'indice de croissance des apex par rang, selon la distance et le type de haie au 14/06/22 (haie de cyprès a) (F=7,57 ; df=3 ; p=7,41e-4) (haie diversifiée c) (F=1,90 ; df=3 ; p=0,15) et au 28/07/22 (haie de cyprès b) (F=2,46 ; df=3 ; p=0,08) et (haie diversifiée d) (F=2,18 ; df=3 ; p=0,11).

Méthode des apex

Le suivi de croissance par la méthode des apex donne des résultats légèrement différents de ceux obtenus par la méthode précédente. La méthode des apex a elle aussi montré des différences significatives entre les modalités pour les sites n°2 et 3 (figures 25 et 26) mais pas pour le site n°1 au 16/06/22 (figure 24a). A la deuxième date d'application de la méthode des apex sur le site n°1, une croissance végétative plus importante est observée pour le premier rang côté Est de l'alignement d'arbres (E1) par rapport aux rangs E3 et E6 (figure 24b).

Pour le site n°2, l'indice de croissance des apex est significativement plus faible pour le premier rang par rapport aux autres modalités au 14/06/22 ($IA_{R1} = 0,82 \pm 0,07 < IA_{RT} = 1,34 \pm 0,05$; $p_{adj} = 3,69e-4$) (figure 25a). Des résultats similaires sont observés au 29/06/22 sur le même site, avec pour seule différence que les valeurs d'indice de croissance des apex sont plus faibles pour toutes les modalités (figure 25b). A la troisième date de mesure, la différence d'indice de croissance des apex entre le premier rang et le rang témoin n'est plus significative ($IA_{R1} = 0,22 \pm 0,08 \approx IA_{RT} = 0,33 \pm 0,07$; $p_{adj} = 1,00$) (figure 25c).

Sur le site n°3, l'indice de croissance des apex présente des valeurs significativement différentes entre les modalités seulement pour les vignes situées dans la partie haie de cyprès (modalités C). Il est plus faible pour le premier rang que pour le témoin ($IA_{C1} = 1,06 \pm 0,04 < IA_{CT} = 1,56 \pm 0,06$; $p_{adj} = 1,49e-4$) à la première date de mesure (figure 26a). Cette différence de vigueur n'est plus visible au 28/07/22 (figure 26b). Aucune différence significative d'indice de croissance des apex n'est observée entre les rangs de vigne côté haie diversifiée aux deux dates de mesure ($p_{adj} = 0,15$; $p_{adj} = 0,11$) (figures 26c et d).

3.2.3 Suivi de l'état hydrique de la vigne

Le potentiel foliaire a tendance à être légèrement plus faible au niveau des premiers rangs de vigne de part et d'autre de l'alignement d'arbres (O1 et E1) (davantage au 16/06/22) (figure 27b). Cependant, aucune différence significative de potentiel hydrique de feuille n'a été mise en évidence entre les modalités de la parcelle n°1 aux trois dates de mesures (figure 27), notamment à cause d'une variabilité importante des valeurs de potentiel de feuille entre les ceps d'un même rang. D'après les seuils de contrainte hydrique définis par l'IFV, au 18/05/22 la contrainte hydrique foliaire moyenne sur le site n°1 peut être considérée comme étant faible ($phf = 10,19 \pm 0,29$ bars) (figure 27a) puis modérée au 16/06/22 ($phf = 13,14 \pm 0,21$ bars) (figure 27b) ainsi qu'au 12/07/22 ($phf = 13,38 \pm 0,19$ bars) (figure 27c).

Sur le site n°2, un gradient de potentiel hydrique foliaire a été mesuré au 20/05/22, avec des valeurs plus faibles en s'éloignant de la haie ($phf_{R1} = 9,60 \pm 0,57$ bars $>$ $phf_{RT} = 6,13 \pm 0,43$ bars ; $p_{adj} = 2,0e-6$) (figure 28a). La contrainte hydrique est faible pour le premier rang de vigne ($phf_{R1} = 9,60 \pm 0,57$ bars), puis absente à partir du troisième rang ($phf_{R3} = 8,53 \pm 0,37$ bars).

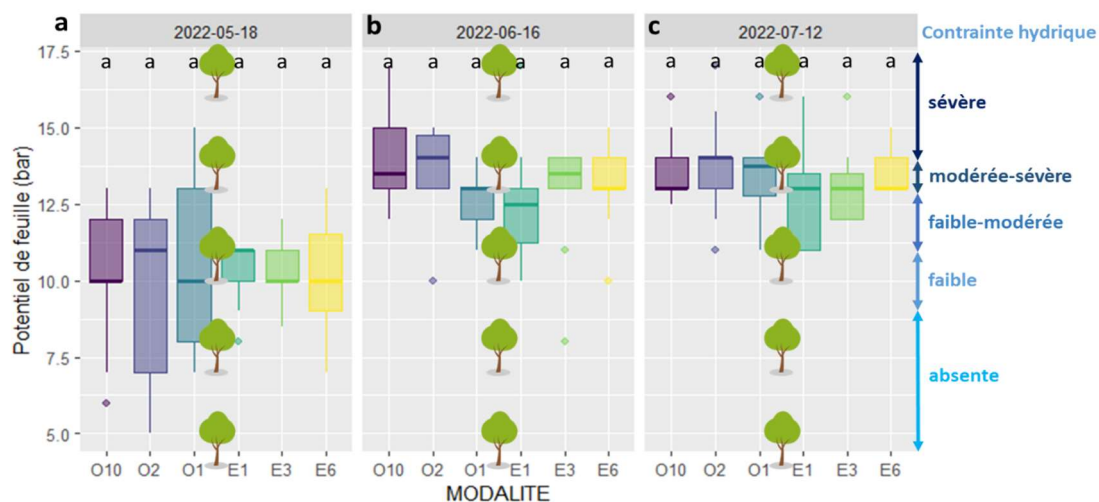


Figure 27 : Potentiel de feuille pour le site n°1. Valeurs moyennes de potentiel hydrique de feuille selon la distance et l'exposition par rapport à l'alignement d'arbres, au 18/05/22 (a) (Kruskal-Wallis chi-squared=0,07 ; df=5 ; p=1,00), 16/06/22 (b) (F=1,30 ; df=5 ; p=0,28) et 12/07/22 (c) (F=0,49 ; df=5 ; p=0,78).

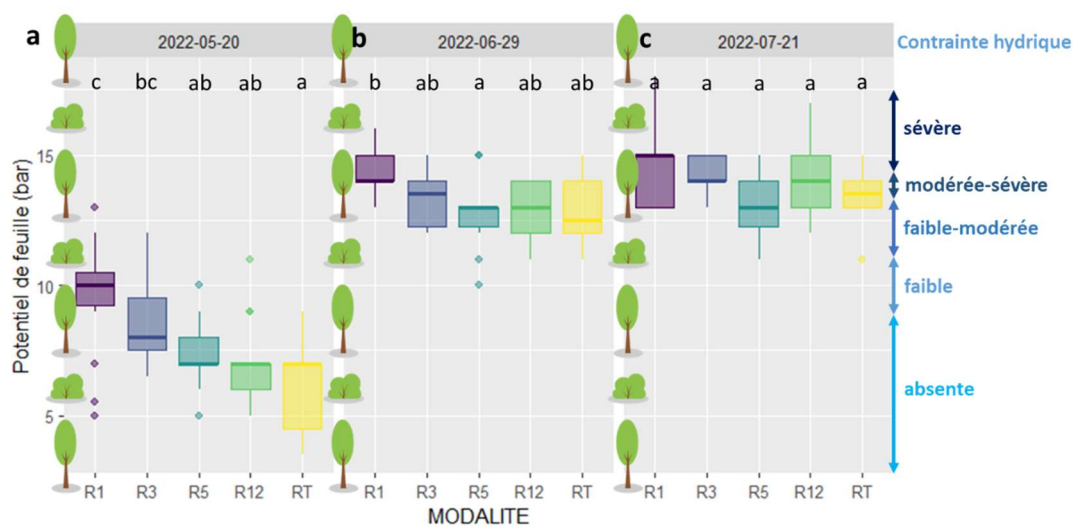


Figure 28 : Potentiel de feuille pour le site n°2. Valeurs moyennes de potentiel hydrique de feuille selon la distance par rapport à la haie, au 20/05/22 (a) (F=10,22 ; df=4 ; p=1,41e-6), 29/06/22 (b) (F=3,12 ; df=4 ; p=0,02) et 21/07/22 (c) (F=2,07 ; df=4 ; p=0,10).

Au 29/06/22, le gradient de potentiel hydrique est moins visible entre les modalités ($\text{phf}_{\text{R1}} = 14,40 \pm 0,27$ bars \approx $\text{phf}_{\text{RT}} = 12,90 \pm 0,41$ bars ; $p.\text{adj} = 0,053$), avec une contrainte hydrique foliaire modérée à l'échelle de la parcelle ($\text{phf} = 13,26 \pm 0,37$ bars) (figure 28b). Au 21/07/22 le gradient de potentiel de feuille n'est plus mis en avant en fonction de la distance à la haie ($\text{phf}_{\text{R1}} = 14,78 \pm 0,55$ bars \approx $\text{phf}_{\text{RT}} = 13,50 \pm 0,37$ bars ; $p.\text{adj} = 0,24$) (figure 28c). A cette date, la contrainte hydrique moyenne sur la parcelle est modérée-sévère d'après les seuils définis par l'IFV ($\text{phf} = 13,96 \pm 0,43$ bars).

Enfin, concernant le potentiel hydrique foliaire mesuré sur la parcelle n°3, des différences significatives sont mises en avant pour les rangs de vignes situés côté haie de cyprès seulement à la deuxième date de mesure, à cause de l'importante variabilité des valeurs de potentiel de feuille entre les ceps d'un même rang au 14/06/22 (figure 29a). Au 28/07/22, les ceps du rang 5 (C5) présentent un potentiel hydrique foliaire significativement plus faible par rapport à ceux du rang 3 ($\text{phf}_{\text{C5}} = 15,33 \pm 0,42$ bars $<$ $\text{phf}_{\text{C3}} = 16,80 \pm 0,15$ bars ; $p.\text{adj} = 0,027$) (figure 29b). Aucune différence significative de potentiel hydrique foliaire n'est observée entre les rangs de vignes situés dans la partie haie diversifiée, probablement à cause d'une variabilité importante des valeurs de potentiel de feuille entre les ceps d'un même rang (figures 29c et d).

Si l'on compare le potentiel hydrique foliaire moyen entre les deux types de haies (cyprès et diversifiée), au 14/06/22 il ne présente pas de différence significative ($\text{phf}_{\text{C}} = 13,66 \pm 0,27$ bars \approx $\text{phf}_{\text{D}} = 13,47 \pm 0,25$ bars ; $p.\text{adj} = 0,69$), en revanche, au 28/07/22 il est en moyenne significativement plus élevé du côté de la haie de cyprès ($\text{phf}_{\text{C}} = 16,32 \pm 0,18$ bars $>$ $\text{phf}_{\text{D}} = 15,78 \pm 0,18$ bars ; $p.\text{adj} = 0,03$).

4. Discussion

4.1 Effets des aménagements agroforestiers sur le développement de pathogènes fongiques

Sachant que l'oomycète *Plasmopara viticola* a besoin d'une pluviométrie importante pour se propager (Galet, 1999), aucun symptôme de mildiou n'a été observé, probablement à cause de la faible quantité de précipitations du printemps et de l'été 2022. Cette année-là, seulement 152 mm de pluie sont tombés entre janvier et juillet à Nîmes (à proximité des sites n°2 et 3), soit 50% de moins que la normale. A Aubenas (à proximité du site n°1), de janvier à juillet 2022, les précipitations ont été de 195 mm, soit 59% de moins que la normale [10]. De plus, les trois sites sont situés en climat méditerranéen (caractérisé par un été chaud et sec), qui n'est pas très favorable au développement du mildiou.

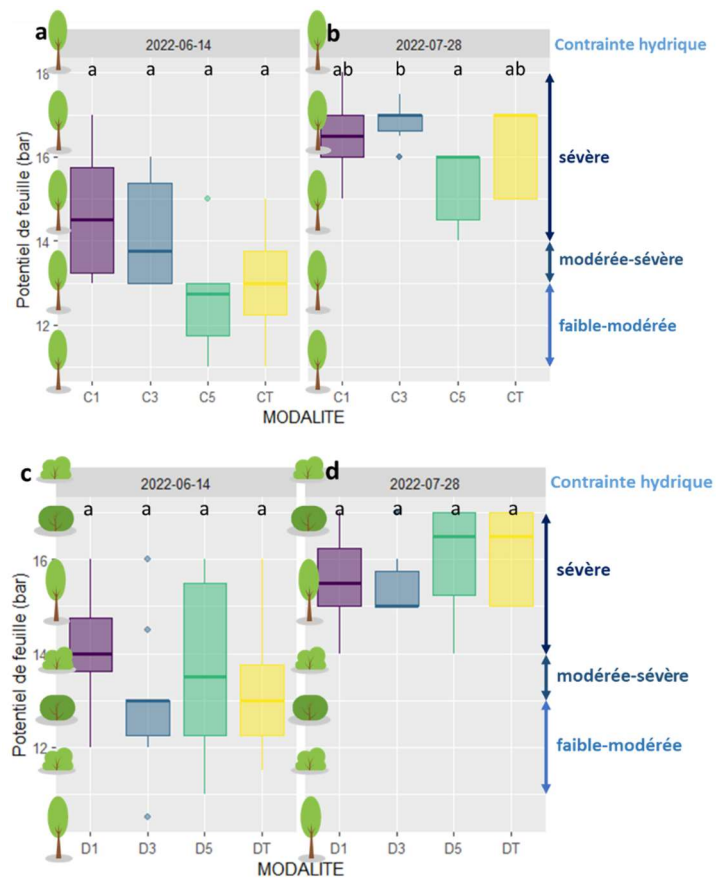


Figure 29 : Potentiel de feuille pour le site n°3. Valeurs moyennes de potentiel hydrique de feuille selon la distance et le type de haie au 14/06/22 (haie de cyprès **a**) ($F=3,17$; $df=3$; $p=0,04$) (haie diversifiée **c**) ($F=0,96$; $df=3$; $p=0,42$) et au 28/07/22 (haie de cyprès **b**) (Kruskal-Wallis chi-squared=8,28 ; $df=3$; $p=0,04$) (haie diversifiée **d**) ($F=0,71$; $df=3$; $p=0,56$).

En revanche, ces conditions climatiques (été chaud, sec et venteux) (Infoclimat.fr) sont plutôt favorables au développement et à la propagation de l'oïdium (Pearson and Gärtel, 1985). Aucun symptôme de cette maladie n'a été observé probablement suite aux multiples passages de traitements à base de soufre effectués sur les trois parcelles expérimentales pour lutter contre ce pathogène.

En outre, en relevant la température de l'air sur la parcelle n°3 (dont la haie, placée côté Nord de la parcelle, présente un effet brise-vent potentiel), elle s'est révélée être légèrement plus élevée du premier au douzième rang de vigne par rapport au témoin ($\Delta T^{\circ}_{R12-RT} = +0,8^{\circ}\text{C}$ à 14h au mois de juin). Le vent dominant sur ce site est le vent du Nord [5], qui est plus frais que l'air ambiant. Ainsi, nous pouvons supposer que cette légère augmentation de la température de l'air est liée à la haie qui fait office de brise vent. En admettant cette hypothèse et sachant que *Uncinula necator* a besoin de vent pour se propager (Pearson and Gärtel, 1985), il est probable que la dissémination des spores d'oïdium soit ralentie dans la parcelle, jusqu'au douzième rang de vigne, par l'effet brise vent de la haie de cyprès et de pistachiers.

Pour vérifier cette hypothèse il serait possible de placer des anémomètres à différentes distance de la haie afin de mesurer la vitesse du courant d'air au sein de la parcelle de vigne. La fréquence de traitements à base de soufre pourrait également être réduite afin de tenter d'observer un gradient d'apparition des symptômes d'oïdium selon la distance à la haie.

4.2 Effets des aménagements agroforestiers sur la croissance végétative de la vigne

D'après les mesures effectuées sur le microclimat (température et humidité de l'air, PAR, tension du sol), un effet de la présence des arbres sur ces paramètres a été mis en avant dans certains cas. Concernant la température de l'air, elle est réduite le matin sur le premier rang de vigne côté Ouest des aménagements agroforestiers (jusqu'à $1,9^{\circ}\text{C}$) et le soir côtés Sud et Est (jusqu'à $2,1^{\circ}\text{C}$) (sites n°1 et 2) (tableau II). Le PAR est réduit le matin côté Ouest des aménagements agroforestiers (sites n°1 et 3) (tableau III). Cependant, aucune diminution du PAR n'est observée le soir côté Est de l'alignement d'arbres par rapport au témoin (tableau III).

Si l'on compare les périodes de réduction de la température de l'air, aux périodes de réduction du PAR sur les rangs de vignes les plus proches des aménagements agroforestiers, on remarque qu'elles sont similaires (tableaux II et III). Nous pouvons en déduire que la réduction de la température de l'air sur le rang le plus proche des arbres (à 3 ou 4 m selon les sites) est due à l'ombre produite par le houppier des arbres.

Au midi solaire (14h), la température de l'air augmente dans certains cas côté Sud et Ouest des aménagements arborés jusqu'à 1,6°C (sites n°2 et 3) (tableau III). Cette hausse de température de l'air est à nuancer car elle est en moyenne plus importante au mois d'avril qu'au mois de juin sur le site n°2 ($\Delta T^{\circ}_{R1-RT} = +1,2^{\circ}\text{C}$ en avril ; $\Delta T^{\circ}_{R1-RT} = +0,5^{\circ}\text{C}$ en juin) et sur le site n°3 l'écart de température moyen est plus élevé en mai qu'en juillet ($\Delta T^{\circ}_{C1-T} = +1,6^{\circ}\text{C}$ en mai ; $\Delta T^{\circ}_{C1-T} = +1,1^{\circ}\text{C}$ en juillet) (tableau III). Sur le site n°2, la hausse de température à 14h est probablement dû à l'effet brise vent de la haie qui limite la circulation du courant d'air plus frais venant du nord. En revanche, sur le site n°3, la haie n'a pas d'effet brise vent (le vent dominant est le vent du Nord et la haie est située côté Est de la parcelle) (figure 14). La différence de température reste donc inexpliquée sur ce site.

La réduction de la température de l'air proche des arbres peut être bénéfique pour la croissance de la vigne en cas de fortes chaleurs (Grimaldi, 2018). Or, ici nous avons vu que la température de l'air était essentiellement réduite le matin et le soir, mais que lors des pics de température en pleine journée, elle pouvait augmenter de plus d'1°C dans certains cas. Ces résultats montrent que l'effet des arbres sur la réduction de la température sont limités.

Les suivis de croissance végétative de la vigne (mesure de la longueur totale des rameaux et suivi de croissance des apex) ont montré des réductions significatives de vigueur des ceps de vigne par rapport au témoin principalement sur le premier et le troisième rang de vigne du site n°2 (haie de cyprès et de pistachier) et sur le premier rang de vigne côté haie de cyprès du site n°3 (figures 23, 25 et 26). Ces réductions de croissance végétative sont peut-être en partie dues à l'ombre causée par les cyprès côté Ouest des arbres le matin, ce qui engendre une compétition pour la lumière entre les arbres et la vigne. Néanmoins, il est plus probable que la réduction de la vigueur de la vigne à proximité des aménagements arborés soit essentiellement dû à la compétition pour la ressource en eau entre les cyprès et la vigne. Les effets de compétitions entre les aménagements agroforestiers et la vigne sont réduits dès le troisième rang de vigne situé à environ 7 à 8 m de l'aménagement. Il est donc judicieux de ne pas planter de vigne trop près de ces aménagements.

Un résultat inattendu est observé sur le site n°3, avec une vigueur plus forte des ceps de vigne au niveau du premier rang (E1) qu'un niveau des rangs 3 (E3) et 6 (E6) côté Est de l'alignement d'arbres (figure 24b). D'après la bibliographie, les arbres réfléchissent une partie de la lumière qu'ils reçoivent (Sinoquet *et al.*, 2001). En effet, si l'on regarde la quantité de PAR reçu par les vignes de la modalité E1, on remarque que de 12h à 16h elle est plus importante que celle reçue par les vignes de la modalité témoin (Annexe III). Il est possible que cette quantité de rayonnement reçue en plus soit à l'origine de la plus forte vigueur des vignes de la modalité E1 par rapport à celle des vignes des modalités E3 et E6.

4.3 Effets des aménagements agroforestiers sur l'état hydrique de la vigne

Tout d'abord, si l'on s'intéresse à l'effet des arbres sur l'état hydrique du sol, on remarque que la tension du sol est généralement plus élevée au niveau du premier rang de vigne. C'est le cas sur le site n°3 à 20 et 40 cm de profondeur, surtout à proximité de la haie de cyprès (C1) mais également à proximité de la haie diversifiée (D1) qui est composée en partie de cyprès (figure 20). Sur le site n°1, à 20 cm de profondeur, la tension du sol est plus élevée pour le témoin. Cependant, à 40 cm, on retrouve des résultats similaires à ceux observés sur le site n°3, c'est-à-dire une tension du sol plus élevée sur les premiers rangs de vigne côté Est (E1) et Ouest (O1) de l'alignement d'arbres intraparcéllaires (figure 19). Les mesures de potentiel de base sur le site n°1 donnent des résultats similaires, avec un potentiel de base plus élevé proche des arbres (figure 21). Ces résultats soulignent que les cyprès puisent davantage d'eau dans le sol que les autres espèces implantées sur les deux sites. Ainsi, le choix du cyprès n'est pas très judicieux en agroforesterie, mis à part pour son effet brise vent.

Concernant la contrainte hydrique de la vigne, sur le site n°1, aucune différence significative de potentiel hydrique foliaire n'est mise en avant entre les modalités (figure 27), même si la tension du sol est plus élevée au niveau des rangs E1 et O1. Plusieurs justifications peuvent être envisagées. Soit, bien que la réserve en eau du sol soit plus faible à proximité des arbres, elle reste suffisante pour maintenir une contrainte hydrique modérée sur la vigne au mois de juillet grâce aux 34 mm de pluie fin juin qui ont permis de recharger complètement la réserve en eau du sol pour toutes les modalités sauf pour E1 (figure 19b) ; soit l'évapotranspiration de la vigne est réduite à proximité des arbres grâce à la réduction de la température et à l'augmentation de l'humidité de l'air (tableau II).

Sur le site n°2, la contrainte hydrique est plus forte à proximité de la haie (de cyprès et de pistachiers), surtout au mois de mai (figure 28a). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus pour la tension du sol sur le site n°3 (figure 20), c'est-à-dire une disponibilité en eau plus faible sur le premier rang à côté de la haie de cyprès. Sachant que le sol est très caillouteux (60 à 70% de galets rhodaniens) et séchant, il est probable que le potentiel de feuille sur le premier rang de vigne (R1) soit élevé à cause de la compétition pour la ressource en eau entre les cyprès et la vigne.

La contrainte hydrique de la parcelle augmente à la fin du printemps et pendant l'été (de faible à modérée sévère) à cause des faibles précipitations (10 mm fin juin et 0,6 mm en juillet) [\[10\]](#) (figure 28). Cependant, en juin, le gradient de potentiel de feuille est moins visible en fonction de la distance à la haie, puis devient absent en juillet, alors que le résultat attendu était plutôt un maintien voire une augmentation du gradient de contrainte hydrique à proximité des cyprès. Ce phénomène est peut-être lié à l'effet brise vent de la haie, qui peut permettre de réduire l'évapotranspiration de la vigne (Campi *et al.*, 2009), ce qui limite les pertes et donc le prélèvement d'eau dans le sol par la vigne. Sur ce site, l'effet délétère des cyprès pour la vigne (compétition pour l'eau) s'estompe au cours de la saison et est absent en été lorsque la vigne a le plus besoin d'eau.

Enfin, sur la parcelle n°3, le potentiel hydrique de feuille est plus significativement plus faible seulement sur le rang 5 côté haie de cyprès (C5) par rapport au rang 3 (C3) (figure 29b). Les ceps du rang 5 étant moins développés que ceux du rang témoin (figure 23c), il est possible que l'évapotranspiration des ceps de vigne de ce rang soit plus faible, ce qui induit un plus faible puisement d'eau dans le sol par la vigne. Ainsi, les ceps de ce rang ont plus d'eau à leur disposition et présentent un potentiel de feuille bas. Cependant, les ceps du rang 1 côté haie de cyprès (C1) sont eux aussi moins développés que ceux des rangs 3 et témoin (figure 23c), pourtant le potentiel de feuille de la modalité C1 n'est pas significativement différent de celui de la modalité témoin (figures 29a et b). Cela peut s'expliquer par la présence des cyprès qui puisent de l'eau dans le sol au niveau du premier rang de vigne (figure 20). Ainsi, la vigne dispose d'une ressource en eau plus faible et même si elle en consomme peu (peu de végétation donc peu d'évapotranspiration) le potentiel hydrique foliaire de la plante est élevé.

4.4 Perspectives

Certains résultats obtenus au cours de l'étude sont incohérents et d'autres restent inexpliqués. Par exemple, la tension du sol sur le site n°1 pour les modalités E1 et E3 à 20 cm de profondeur évolue de façon anormale par rapport aux autres modalités entre les mois de juin et de juillet. Cela est certainement dû à une mauvaise installation des tensiomètres. Lors de la mise en place il est possible que le contact entre la sonde et le sol n'ait pas été correctement effectué. Ainsi, le tensiomètre ne peut pas mesurer la tension du sol environnant.

Une variabilité importante des valeurs de potentiel hydrique de feuille est observée au sein des modalités, principalement pour les sites n°1 et 3 (figures 27 et 29). Cela peut être dû à plusieurs facteurs : l'hétérogénéité de la parcelle, le manipulateur ou encore la précision de la méthode. De plus, le potentiel hydrique d'une feuille n'est pas forcément représentatif du potentiel hydrique de la plante entière. Pour tenter de réduire cette variabilité et d'estimer l'état hydrique global de la plante, il est possible de mesurer le potentiel hydrique foliaire de tige. Le protocole est similaire à celui de la mesure du potentiel hydrique foliaire, à la différence que les feuilles sont ensachées au moins 2h avant la mesure dans un sachet imperméable et opaque afin que le potentiel hydrique de la feuille s'équilibre avec celui du rameau, représentatif du statut hydrique de la plante entière [\[11\]](#).

Afin de mieux évaluer l'effet brise vent de la haie de cyprès et de pistachiers du site n°2, il serait possible de mesurer la vitesse du vent sur la parcelle à l'aide d'anémomètres placés à différentes distances de la haie, ainsi que de caractériser la porosité de cette haie en la prenant en photo puis à l'aide de logiciels de traitement d'images.

Pour aller plus loin dans l'évaluation de l'effet des aménagements agroforestiers sur l'état hydrique de la vigne, il serait possible d'estimer l'évapotranspiration des ceps de vigne en fonction de l'exposition et la distance des rangs de vigne aux aménagements arborés, en connaissant au minimum le rayonnement, la température et l'humidité relative de l'air, ainsi que la vitesse du vent pour chaque modalité.

Cette étude s'est intéressée principalement à l'effet de la modulation du microclimat par les aménagements arborés sur la croissance et l'état hydrique de la vigne. Une prochaine expérimentation va avoir lieu dans le cadre du projet VITAM après les vendanges, afin de quantifier et d'analyser les effets de l'agroforesterie sur la qualité du raisin et du vin.

5. Conclusion

Dans cette étude, aucun effet des aménagements agroforestiers n'a été mis en avant concernant le développement des pathogènes fongiques de la vigne. En revanche, un effet de concurrence entre les arbres et la vigne a été observé dans certains cas, limitant ainsi la croissance végétative des ceps de vigne. Ce phénomène a été observé sur les deux sites plantés en haie de cyprès (sites n°2 et 3), au niveau du premier rang de vigne. L'impact des cyprès sur la vigueur de la vigne s'est avéré être réduit voire nul à partir du troisième rang.

L'année 2022 étant très sèche, il n'est pas étonnant d'avoir observé de la compétition pour la ressource en eau entre les aménagements agroforestiers et la vigne, avec généralement une disponibilité en eau plus faible au niveau du rang de vigne le plus proche des arbres. Malgré une tension du sol plus élevée à côté des arbres, le potentiel hydrique de feuille de la vigne n'a pas été très impacté, probablement grâce à la réduction de l'évapotranspiration de la vigne à proximité des aménagements arborés. Ce phénomène est en parti dû à l'ombre générée par les arbres, ainsi qu'à leur effet brise-vent. Il dépend également de d'autres facteurs (comme la résistance stomatique, la quantité d'eau accessible pour la plante...), ce qui le rend complexe à mesurer.

Ainsi, les effets des aménagements agroforestiers sur le microclimat peuvent être bénéfiques comme délétères pour la vigne. Cela va dépendre des conditions climatiques, de l'environnement de la parcelle, de l'orientation de l'aménagement arboré par rapport à la parcelle, des essences implantées, de la distance d'implantation, de l'orientation des rangs de vigne ou encore de la structure, de la qualité, de la profondeur et de la capacité du sol à retenir l'eau. La complexité des systèmes agroforestiers justifie la nécessité de l'accompagnement des agriculteurs dans leur projet de plantation par des organismes spécialisés, afin de prendre en compte le système dans sa globalité avant de commencer à planter des haies en bordure de parcelle ou des alignements d'arbres intraparcéllaires.

6. Bibliographie

- Abeyasinghe S, Greer D, Rogiers S.** 2019. The effect of light intensity and temperature on berry growth and sugar accumulation in *Vitis vinifera* 'Shiraz' under vineyard conditions. *Vitis -Geilweilerhof-* **58**, 7–16.
- Artru S, Garré S, Dupraz C, Hiel M-P, Blitz-Frayret C, Lassois L.** 2017. Impact of spatio-temporal shade dynamics on wheat growth and yield, perspectives for temperate agroforestry. *European Journal of Agronomy* **82**, 60–70.
- Bayala J, Wallace JS.** 2015. The water balance of mixed tree-crop systems. *Tree-crop interactions: agroforestry in a changing climate*, 146–190.
- Benton TG, Vickery JA, Wilson JD.** 2003. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology & Evolution* **18**, 182–188.
- Bourgade E, Alonso Ugaglia A, Bustillo V, Dufourcq T, Grimaldi J, Guenser J, Montagne V, Ranjard L, Ugaglia A.** 2020. VITIFOREST : Evaluation de l'impact de l'arbre agroforestier en contexte viticole. *Innovations Agronomiques* **79**, 471–497.
- Campi P, Palumbo AD, Mastrorilli M.** 2009. Effects of tree windbreak on microclimate and wheat productivity in a Mediterranean environment. *European Journal of Agronomy* **30**, 220–227.
- Cardinael R, Chevallier T, Cambou A, Béral C, Barthès BG, Dupraz C, Durand C, Kouakoua E, Chenu C.** 2017. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **236**, 243–255.
- Choné X, Van Leeuwen C, Dubourdieu D, Gaudillère JP.** 2001. Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status. *Annals of Botany* **87**, 477–483.
- Cleugh HA.** 1998. Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems* **41**, 55–84.
- D'Hervilly C, Bertrand I, Capowiez Y, Béral C, Delapré-Cosset L, Marsden C.** 2022. Seasonal variations in macrofauna distribution according to the distance from a herbaceous strip in a Mediterranean alley cropping plot. *Applied Soil Ecology* **170**, 104309.
- Dupraz C, Liagre F.** 2019. *Agroforesterie: des arbres et des cultures*.
- Freeman BM, Kliewer WM, Stern P.** 1982. Influence of Windbreaks and Climatic Region on Diurnal Fluctuation of Leaf Water Potential, Stomatal Conductance, and Leaf Temperature of Grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* **33**, 233–236.
- Galet.** 1999. *Précis de pathologie viticole, 3e édition*.
- Gómez-del-Campo M, Ruiz C, Lissarrague JR.** 2002. Effect of Water Stress on Leaf Area Development, Photosynthesis, and Productivity in Chardonnay and Airén Grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* **53**, 138–143.
- Grimaldi J.** 2018. Impacts of agroforestry on microclimate for grape and wine production: assessment in Southern France.
- Heuvel JEV, Proctor JTA, Fisher KH, Sullivan JA.** 2004. Shading Affects Morphology, Dry-matter Partitioning, and Photosynthetic Response of Greenhouse-grown 'Chardonnay' Grapevines. *HortScience* **39**, 65–70.

Judd MJ, Raupach MR, Finnigan JJ. 1996. A wind tunnel study of turbulent flow around single and multiple windbreaks, part I: Velocity fields. *Boundary-Layer Meteorology* **80**, 127–165.

Lorenz DH, Eichhorn KW, Bleiholder H, Klose R, Meier U, Weber E. 1995. Growth Stages of the Grapevine: Phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*)—Codes and descriptions according to the extended BBCH scale†. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **1**, 100–103.

Pearson RC, Gärtel W. 1985. Occurrence of Hyphae of *Uncinula necator* in Buds of Grapevine. *Plant Disease* **69**, 149.

Pienaar JW. 2005. The effect of wind on the performance of the grapevine.

Riha S, McIntyre B. 1999. Water Management with Hedgerow Agroforestry Systems. 47–65.

Scholander PF, Bradstreet ED, Hemmingsen EA, Hammel HT. 1965. Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science* **148**, 339–346.

Sinoquet H, Le Roux X, Adam B, Ameglio T, Daudet FA. 2001. RATP: a model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within canopies: application to an isolated tree crown. *Plant, Cell & Environment* **24**, 395–406.

Smart R, Robinson M. 1991. *Sunlight into wine*. Winetitles.

Thind TS, Arora JK, Mohan C, Raj P. 2004. Epidemiology of Powdery Mildew, Downy Mildew and Anthracnose Diseases of Grapevine. In: Naqvi SAMH, ed. *Diseases of Fruits and Vegetables Volume I: Diagnosis and Management*. Dordrecht: Springer Netherlands, 621–638.

Thomson LJ, Hoffmann AA. 2009. Vegetation increases the abundance of natural enemies in vineyards. *Biological Control* **49**, 259–269.

Thomson LJ, McKenzie J, Sharley DJ, Nash MA, Tsitsilas A, Hoffmann AA. 2010. Effect of woody vegetation at the landscape scale on the abundance of natural enemies in Australian vineyards. *Biological Control* **54**, 248–254.

Van Leeuwen C, Destrac-Irvine A. 2017. Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One* **51**, 147–154.

7. Sitographie

[1] : FranceAgriMer (2020). Les chiffres clés de la filière viti-vinicole. https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/65545/document/CC-VIN-2020-chiffres-cles_vin_2009-2019.pdf?version=2 (consulté le 12/04/2022)

[2] : INAO (2021). Rapport d'activité. <https://www.inao.gouv.fr/Nos-actualites/ra2021> (consulté le 04/04/2022)

[3] : Ministère de l'Agriculture (2019). L'agroforesterie, comment ça marche ? <https://agriculture.gouv.fr/lagroforesterie-comment-ca-marche> (consulté le 17/03/2022)

[4] : Agroof (2019). Rapport PIRAT. <https://agroof.net/recherche/fichesRD/pirat.html> (consulté le 19/05/2022)

[5] : Windfinder (2022). <https://fr.windfinder.com/#3/34.1618/-20.3906/2022-08-03T09:00Z> (consulté le 13/06/2022)

[6] : Vigne et Vin Occitanie (2020). Mesure du potentiel hydrique foliaire de base. <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/mesure-du-potentiel-hydrique-foliaire-de-base/#:~:text=Le%20potentiel%20hydrique%20est%20not%C3%A9,effectu%C3%A9es%20sur%20la%20modalit%C3%A9%20d%C3%A9termin%C3%A9e> (consulté le 21/06/2022)

[7] : Vigne et Vin Occitanie (2020). Méthode des apex. <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/methode-des-apex/> (consulté le 23/06/2022)

[8] : Vigne et Vin Occitanie (2020). Estimation de l'état hydrique de la vigne <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/estimation-de-letat-hydrique-de-la-vigne/> (consulté le 21/06/2022)

[9] : Météo Ciel (2022). <https://www.meteociel.fr/> (consulté le 03/08/2022)

[10] : Infoclimat (2022). <https://www.infoclimat.fr/> (consulté le 07/08/2022)

[11] : IFV (2020). Mesure du potentiel hydrique foliaire de tige. <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/mesure-du-potentiel-hydrique-foliaire-de-tige/> (consulté le 22/07/2022)

ANNEXES

Annexe I : Echelle BBCH des stades phénologiques de la vigne (source : Lorenz et al., 1995)

La vigne Lorenz et al., 1994

Échelle BBCH des stades phénologiques de la vigne

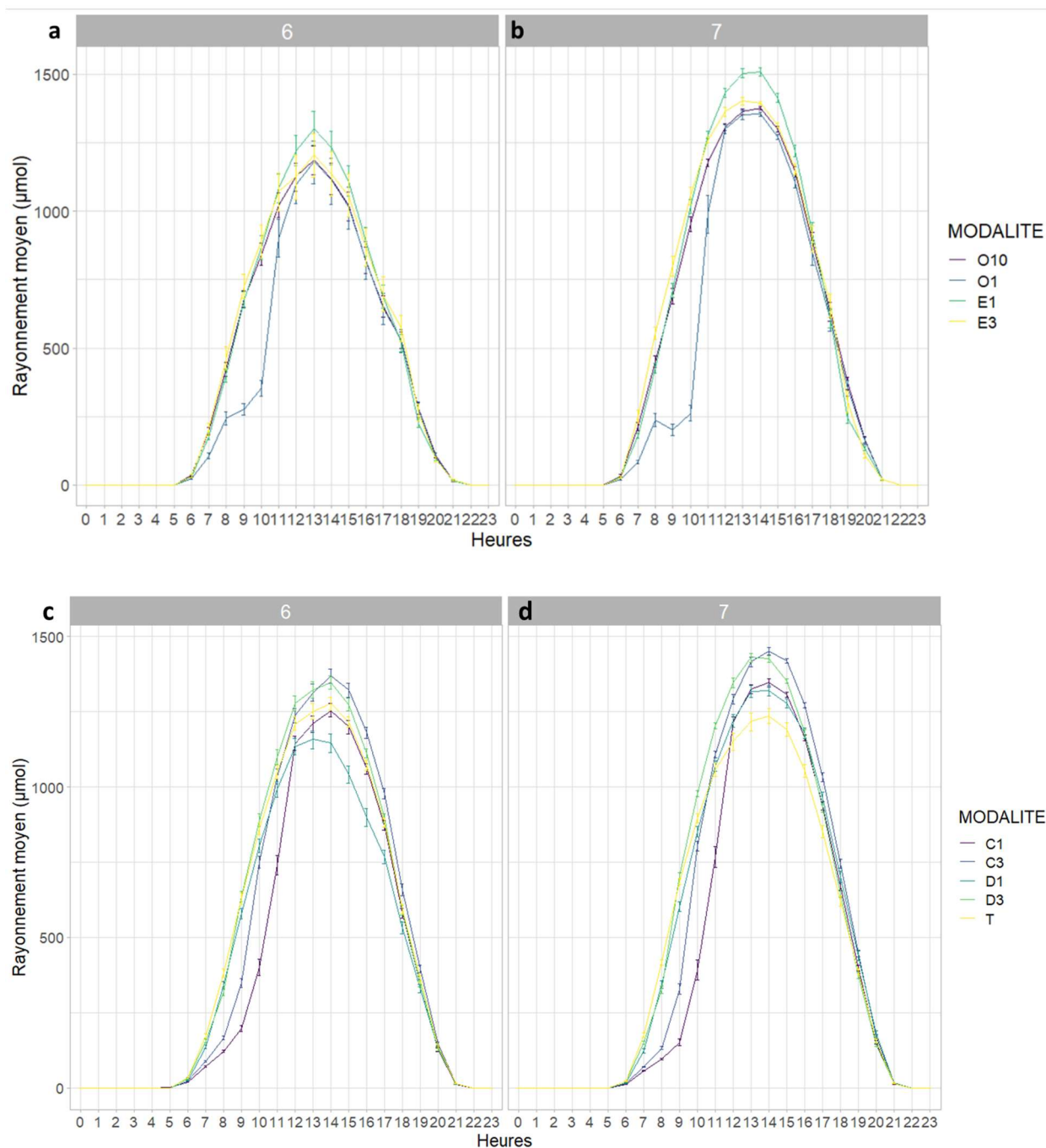
(*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*)



Code	Définition
Stade principal 0: bourgeonnement ou débourrement	
00	dormance: les bourgeons d'hiver sont pointus à arrondis, suivant la variété ils sont brun clair à foncé et les écailles sont plus ou moins appliquées aux bourgeons
01	début du gonflement des bourgeons: les bourgeons s'allongent à l'intérieur des écailles
03	fin du gonflement des bourgeons, les bourgeons ne sont pas encore verts
05	«stade de la bourre»: une protection cotonneuse est nettement visible
07	début de l'éclatement des bourgeons (débourrement): l'extrémité verte de la jeune pousse est juste visible
09	débourrement: l'extrémité verte de la jeune pousse est nettement visible
Stade principal 1: développement des feuilles	
11	première feuille étalée et écartée de la pousse
12	2 feuilles étalées
13	3 feuilles étalées
14	et ainsi de suite ...
19	9 ou davantage de feuilles sont étalées
Stade principal 5: apparition des inflorescences	
53	les grappes (inflorescences) sont nettement visibles
55	les grappes augmentent de taille, les boutons floraux sont agglomérés
57	les grappes sont bien développées, les fleurs se séparent
Stade principal 6: la floraison	
60	les premiers capuchons floraux se séparent du réceptacle
61	début de la floraison: 10% des capuchons floraux sont tombés
62	20% des capuchons floraux sont tombés
63	floraison partielle: 30% des capuchons floraux sont tombés
64	40% des capuchons floraux sont tombés
65	mi-floraison: 50% des capuchons floraux sont tombés
66	60% des capuchons floraux sont tombés
67	70% des capuchons floraux sont tombés
68	la floraison s'achève: 80% des capuchons floraux sont tombés
69	fin de la floraison
Stade principal 7: développement des fruits	
71	nouaison: début du développement des fruits, toutes les pièces florales sont tombées
73	les fruits (baies) ont la grosseur de plombs de chasse, les grappes commencent à s'incliner vers le bas
75	les baies ont la grosseur de petit-pois, les grappes sont en position verticale
77	début de la fermeture de la grappe (les baies commencent à se toucher)
79	la fermeture de la grappe est complète, les fruits ont fini de grossir
Stade principal 8: maturation des baies	
81	début de la maturation: les baies commencent à s'éclaircir et/ou à changer de couleur
83	éclaircissement et/ou changement de couleur en cours
85	véraison: les baies deviennent molles au toucher
89	les baies sont mûres pour la vendange
Stade principal 9: sénescence ou début du repos végétatif	
91	après la vendange: l'aoûtement du bois est terminé
92	début de la coloration des feuilles
93	début de la chute des feuilles
95	50% des feuilles sont tombées
97	fin de la chute des feuilles
99	baies mûres en phase de conservation

Annexe II : Tests statistiques appliqués à chaque variable.

Site	Date	Variable	Transformation	Shapiro (p-value)	Bartlett (p-value)	Test statistique	Valeur du test	Df	p-value
n°1	18/05/2022	Pot. Feuille	-	0,53	0,02	Kruskal-Wallis	0,07	5	1,00
n°1	18/05/2022	Pot. Base	-	0,035	0,19	-	-	-	-
n°1	18/05/2022	Pot. Base	x^(0,2121212)	0,21	0,11	ANOVA	2,71	5	0,03
n°1	18/05/2022	Long tot rameaux	-	0,11	1,70E-04	Kruskal-Wallis	13,16	5	0,02
n°1	16/06/2022	Pot. Feuille	-	0,03	0,37	-	-	-	-
n°1	16/06/2022	Pot. Feuille	x^(1,969697)	0,08	0,36	ANOVA	1,30	5	0,28
n°1	16/06/2022	Croissance apex IA	-	8,80E-04	0,18	Kruskal-Wallis	12,80	5	0,03
n°1	21/06/2022	Pot. Base	-	0,29	0,62	ANOVA	3,58	5	0,02
n°1	12/07/2022	Pot. Feuille	-	0,062	0,39	ANOVA	0,49	5	0,78
n°1	12/07/2022	Croissance apex IA	-	0,47	0,64	ANOVA	4,26	5	1,68E-03
n°2	20/05/2022	Pot. Feuille	-	0,31	0,25	ANOVA	10,22	4	1,41E-06
n°2	20/05/2022	Long tot rameaux	-	0,3	6,20E-04	Kruskal-Wallis	38,84	4	7,53E-08
n°2	14/06/2022	Croissance apex IA	-	0,02	0,68	Kruskal-Wallis	37,30	4	1,53E-07
n°2	29/06/2022	Pot. Feuille	-	0,54	0,48	ANOVA	3,12	4	0,02
n°2	29/06/2022	Croissance apex IA	-	0,02	0,21	Kruskal-Wallis	33,70	4	8,45E-07
n°2	21/07/2022	Pot. Feuille	-	0,54	0,28	ANOVA	2,07	4	0,10
n°2	21/07/2022	Croissance apex IA	-	0,07	0,97	ANOVA	3,59	4	0,01
n°3	31/05/2022	Long tot rameaux	-	0,27	1,50E-05	Kruskal-Wallis	37,97	7	3,07E-06
n°3 C	14/06/2022	Croissance apex IA	-	0,68	0,10	ANOVA	7,57	3	7,41E-04
n°3 C	14/06/2022	Pot. Feuille	-	0,06	0,93	ANOVA	3,17	3	0,04
n°3 C	28/07/2022	Croissance apex IA	-	0,06	0,45	ANOVA	2,46	3	0,08
n°3 C	28/07/2022	Pot. Feuille	-	7,10E-04	0,17	Kruskal-Wallis	8,28	3	0,04
n°3 D	14/06/2022	Pot. Feuille	-	0,21	0,47	ANOVA	0,96	3	0,42
n°3 D	14/06/2022	Croissance apex IA	-	0,45	0,94	ANOVA	1,90	3	0,15
n°3 D	28/07/2022	Pot. Feuille	-	0,06	0,79	ANOVA	0,71	3	0,56
n°3 D	28/07/2022	Croissance apex IA	-	0,58	0,05	ANOVA	2,18	3	0,11

Annexe III : Rayonnement photosynthétiquement actif journalier moyen sur les sites n°1 et 3. Valeurs moyennes par heure du PAR sur le site n°1 pour les mois de juin (a) et juillet (b) et sur le site n°3 pour les mois de juin (c) et juillet (d) en fonction de la distance, de l'exposition et du type d'aménagement agroforestier.



<div>   UNIVERSITÉ DE NANTES</div>	<div>Diplôme : Master Mention : Biologie Végétale (BV) Parcours : Gestion de la Santé des Plantes</div>	
<div>Auteur(s) : Antonin BOSC Date de naissance* : 09/01/1999</div>		<div>Organisme d'accueil : Agroof Adresse : 19 Rue du Luxembourg 30140 Anduze Maître de stage : Camille BERAL</div>
<div>Nb pages : 26 Annexe(s) : 3</div>		
<div>Année de soutenance : 2022</div>		
<div>Titre français : Croissance et développement des vignes en agroforesterie en contexte méditerranéen Titre anglais : Growth and development of vines in agroforestry in a Mediterranean context</div>		

Résumé : Dans le contexte actuel du réchauffement climatique, la vigne doit faire face à des étés de plus en plus chauds et secs. L'agroforesterie peut être une pratique à développer pour anticiper ces changements. Les systèmes agroforestiers modifient les flux radiatifs et aériens, ce qui influence le microclimat à l'échelle de la parcelle. Cela peut avoir des répercussions sur le comportement de la vigne située à proximité des arbres, au niveau des stress thermique et hydrique, ainsi que de la pression de maladie.

Cette étude est menée dans le cadre du projet VITAM et a pour objectif d'acquérir des données sur la croissance et le développement des vignes en agroforesterie en méditerranée. La phénologie, la croissance, l'état sanitaire ainsi que l'état hydrique des vignes ont été suivis sur trois sites, en fonction de la distance, de l'exposition et des espèces implantées dans les aménagements agroforestiers.

Les résultats obtenus ne montrent pas d'effets des aménagements agroforestiers sur le développement de pathogènes fongiques. En revanche, une vigueur réduite des ceps de vigne a été observée, principalement au niveau des vignes situées à proximité de cyprès. Cela peut être dû au phénomène de compétition pour la ressource en lumière et en eau entre la vigne et les arbres. Cet effet n'est pratiquement plus visible au-delà d'environ 7 m de l'aménagement.

Cette étude souligne la complexité des interactions entre la vigne et les arbres en systèmes agroforestiers. Il est donc important de prendre en compte l'ensemble des paramètres du milieu avant de se lancer dans l'agroforesterie.

Abstract : In the current context of global warming, vines must face increasingly hot and dry summers. Agroforestry can be a practice to be developed to anticipate these changes. Agroforestry developments modify radiative and aerial flows, which influences the microclimate at the plot level. This can have repercussions on the behaviour of vines located near the trees, in terms of thermal and hydric stress, as well as disease pressure.

This study is conducted within the scope of the VITAM project and aims to acquire data on the growth and development of vines in agroforestry in a Mediterranean context. The phenology, growth, health status and water status of the vines were monitored at three sites, depending on the distance, exposure and species planted in the agroforestry systems.

The results obtained did not show any effect of the agroforestry systems on the development of fungal pathogens. On the other hand, a reduced vigour of the vines was observed, mainly in the vines located near cypress trees. This may be due to the competition for light and water between the vines and the trees. This effect is hardly visible beyond about 7 m from the landscape.

This study highlights the complexity of the interactions between vines and trees in agroforestry systems. It is therefore important to take into account all the parameters of the environment before embarking on agroforestry.

Mots-clés : agroforesterie, microclimat, comportement de la vigne, VITAM

Key Words: agroforestry, microclimate, vine behaviour, VITAM