

Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du Master Sciences et Technologie de l'Agriculture, de
l'Alimentation et de l'Environnement (Master 3A)

Parcours : AgroDesign

Impact de l'utilisation du biochar sur la disponibilité en eau des sols et sur le stress hydrique de la vigne en contexte méditerranéen



par Léa QUITTÉ

Année de soutenance : 2025

Organisme d'accueil : CIVAM BIO 34

Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du Master Sciences et Technologie de l'Agriculture, de
l'Alimentation et de l'Environnement (Master 3A)

Parcours : AgroDesign

Impact de l'utilisation du biochar sur la disponibilité en eau des sols et sur le stress hydrique de la vigne en contexte méditerranéen



par Léa QUITTÉ

Année de soutenance : 2025

Mémoire préparé sous la direction de : Léo GARCIA

Présenté le : 17/09/2025

Devant le jury :

Léo GARCIA

Hélène MARROU

Guillaume COULOUMA

Encadrante de stage :

Morgane MAITREJEAN

Résumé

Cette étude visait à évaluer l'impact d'un amendement en biochar sur la disponibilité et l'infiltration de l'eau dans les sols, ainsi que sur le stress hydrique et la productivité de la vigne en contexte méditerranéen. Elle cherchait également à étudier l'intérêt d'un apport supplémentaire de biochar vis-à-vis d'un apport de compost seul, à évaluer quel type de biochar était le plus performant et quelle dose de biochar permettait d'optimiser ces effets. L'expérimentation a été conduite sur trois parcelles viticoles du sud de la France, durant les saisons 2023-2024 et 2024-2025. Le potentiel hydrique du sol a été suivi, la vitesse d'infiltration de l'eau mesurée, le stress hydrique de la vigne estimé via la méthode des apex et les composantes du rendement ont été étudiées.

Les résultats sur la disponibilité et l'infiltration de l'eau dans les sols montrent des effets contrastés selon les itinéraires techniques, la texture, les conditions saisonnières de pluviométrie et la mise en place des expérimentations. Une amélioration de la disponibilité en eau a été constatée dans un sol à texture grossière, tandis que des effets neutres ou négatifs ont été mis en évidence pour les sols à texture plus fine. Le biochar a permis de favoriser l'infiltration de l'eau dans les sols, en particulier pour les sols limoneux-argileux. La pluviométrie a joué un rôle déterminant dans l'efficacité de l'amendement. Il semble qu'un biochar insuffisamment humidifié ait fortement réduit la disponibilité en eau des sols. L'augmentation de la dose et la diminution de la granulométrie du biochar ont accentué les effets observés. L'amendement a eu un effet positif, bien que très limité, sur la réduction du stress hydrique de la vigne. Enfin, concernant le rendement de la vigne et ses composantes, les effets ont été globalement neutres.

Abstract

This study aimed to evaluate the impact of a biochar amendment on soil water availability and infiltration, as well as on vine water stress and productivity in a Mediterranean context. It also sought to assess the relevance of applying biochar in addition to compost, to identify which type of biochar performed best, and to determine the optimal application rate for maximizing its effects. The experiment was carried out on three vineyard plots in southern France during the 2023-2024 and 2024-2025 seasons. Soil water potential was monitored, water infiltration rates were measured, vine water stress was estimated using the apex method, and yield components were analyzed.

The results regarding soil water availability and infiltration revealed contrasting effects depending on farming practices, soil texture, seasonal rainfall conditions, and the experimental setup. An improvement in water availability was observed in coarse-textured soils, while neutral or negative effects were identified in finer-textured soils. Biochar was found to enhance water infiltration into soils, particularly in silty-clay soils. Rainfall played a decisive role in the effectiveness of the amendment. Insufficiently moistened biochar appeared to reduce soil water availability. Higher application rates and finer particle size of biochar amplified the observed effects. The amendment had a positive, but very limited, effect on reducing vine water stress. Finally, The effects on vine yield and its components were essentially neutral.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le CIVAM BIO 34 de m'avoir accueillie au sein de leur équipe durant cette période de stage. Je remercie ainsi Morgane, Anne, Elodie, Mathilde, Bénédicte, Céline, Andréa et Aurélie pour leur confiance et leur aide dans la compréhension de l'ensemble des projets portés par le CIVAM BIO 34. Plus particulièrement, je suis extrêmement reconnaissante envers Morgane et Anne, qui m'ont guidée et accompagnée dans la mise en place, le suivi et l'analyse des résultats de cette expérimentation sur le biochar. Ce stage a ainsi été pour moi une expérience riche et formatrice.

Je remercie également l'ensemble des viticulteurs avec qui j'ai pu échanger, et plus particulièrement Nicolas, Julien et Frédéric, qui m'ont accueillie avec beaucoup de bienveillance au sein de leurs exploitations et qui ont su prendre le temps de partager leurs expériences. Ces échanges ont été particulièrement passionnants et constructifs.

Enfin, je remercie mon tuteur de stage, Léo Garcia, pour son accompagnement et sa réactivité. Son suivi et sa disponibilité m'ont permis de réaliser ce stage dans les meilleures conditions et de rédiger ce rapport grâce à ses conseils et orientations.

Déclaration

Je soussignée, Léa QUITTÉ, déclare avoir utilisé l'IA générative ChatGPT afin de m'aider dans l'écriture du code utilisé pour l'analyse de données sur le logiciel R-Studio. Après avoir utilisé cet outil, j'ai révisé et édité le contenu si nécessaire et assume l'entière responsabilité du contenu du document.

Table des matières

1. Introduction	1
2. État de l'art	2
2.1. Contexte climatique et viticole dans le département de l'Hérault.....	2
2.1.1. Contexte climatique dans la zone d'expérimentation	2
2.1.2. La viticulture dans le département de l'Hérault	2
2.2. L'eau et la vigne	3
2.2.1. Besoins en eau et impact du stress hydrique sur la vigne.....	3
2.2.2. Pratiques agricoles et stratégies d'adaptation face aux déficits hydriques	4
2.3. L'utilisation du biochar en viticulture : une pratique innovante face aux enjeux hydriques actuels	5
2.3.1. Processus de production et caractéristiques du biochar	5
2.3.2. Intérêt du biochar sur le statut hydrique du sol	6
2.3.3. Intérêt du biochar sur la croissance et la productivité de la vigne	8
2.3.4. Limitations de l'utilisation du biochar selon le contexte pédoclimatique et les conditions expérimentales	9
3. Contexte du stage	10
3.1. Expérimentations menées par le CIVAM BIO 34	10
3.2. Problématique et objectifs	10
4. Matériels et Méthodes.....	11
4.1. Expérimentations sur parcelles viticoles	12
4.1.1. Description des parcelles expérimentales.....	12
4.1.2. Modalités expérimentales étudiées	13
4.1.3. Mesures et suivis réalisés sur les parcelles	16
Mesures relatives à l'état du sol	16
Mesures relatives à l'état de la vigne	18
4.2. Expérimentation sur champ	19
4.2.1. Description des biochars utilisés.....	19
4.2.2. Plan expérimental	20
4.3. Traitement statistique des données	21

5. Résultats	22
5.1. Résultats des expérimentations sur parcelles viticoles.....	22
5.1.1. Effet des modalités sur l'état hydrique du sol	22
Effet des modalités sur la tensiométrie du sol	22
Effet des modalités sur l'infiltration de l'eau dans les sols	26
5.1.2. Effet des modalités sur l'état hydrique et la productivité de la vigne	27
Effet des modalités sur l'état hydrique de la vigne.....	27
Effet des modalités sur le rendement de la vigne et ses composantes	29
5.2. Résultats de l'expérimentation sur champ.....	32
5.2.1. Effet du type de biochar sur la tensiométrie du sol.....	32
5.2.2. Effet de la dose de biochar sur la tensiométrie du sol.....	33
6. Discussion.....	34
6.1. Disponibilité en eau du sol : des résultats variables selon les saisons, les parcelles et les conditions d'expérimentation	34
6.1.1. Des différences selon les parcelles et le type de sol.....	34
6.1.2. Influence de la pluviométrie et des conditions de mise en place	37
6.1.3. Effet des caractéristiques et de la dose de biochar	39
6.1.4. Effet sur l'infiltration de l'eau.....	39
6.2. Stress hydrique et rendement de la vigne	40
6.2.1. Influence sur le stress hydrique	40
6.2.2. Impact sur le rendement et ses composantes	42
6.3. Limites de l'étude, réflexions et pistes d'amélioration.....	44
7. Conclusion	46
Annexes	54

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des parcelles expérimentales.....	13
Tableau 2. Description des spécificités expérimentales propres à chacune des parcelles.....	16
Tableau 3. Interprétation des valeurs tensiométriques (ou potentiel hydrique du sol Ψ_{sol}) sur la contrainte hydrique subie par la vigne.....	17
Tableau 4. Poids de 200 baies (en g) dans les deux parcelles expérimentales (Aspiran et Cournonterral) pour les saisons 2023-2024 et 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées.....	30

Liste des figures

Figure 1. Diagrammes ombrothermiques pour les trois sites expérimentaux (Cournonterral, Aspiran et Adissan) et sur les deux saisons d'expérimentation (2023-2024 et 2024-2025).....	12
Figure 2. Schéma expérimental global mis en place sur les parcelles viticoles.....	14
Figure 3. Cartographie des placettes expérimentales sur champ.....	21
Figure 4. Évolution de la tensiométrie moyenne du sol sur le site d'Aspiran durant la saison 2023-2024 et 2024-2025 en fonction des différentes modalités testées et de la pluviométrie.....	23
Figure 5. Évolution de la tensiométrie moyenne du sol sur le site de Cournonterral durant la saison 2023-2024 et 2024-2025 en fonction des différentes modalités testées et de la pluviométrie.....	24
Figure 6. Évolution de la tensiométrie moyenne du sol sur le site d'Adissan durant la saison 2024-2025 en fonction des différentes modalités testées et de la pluviométrie.....	25
Figure 7. Diagrammes en barres présentant la vitesse d'infiltration de l'eau dans les sols des trois parcelles expérimentales (Aspiran, Cournonterral et Adissan) pour la saison 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées.....	26
Figure 8. Évolution de l'indice de stress hydrique (IC-Apex) sur le site d'Aspiran durant la saison 2023-2024 et 2024-2025 en fonction des différentes modalités testées.....	27
Figure 9. Évolution de l'indice de stress hydrique (IC-Apex) sur le site de Cournonterral durant la saison 2023-2024 en fonction des différentes modalités testées.....	28

Figure 10. Évolution de l'indice moyen de stress hydrique (IC-Apex) sur le site d'Adissan durant la saison 2024-2025 en fonction des différentes modalités testées.....	29
Figure 11. Diagrammes en barres présentant le nombre de grappes moyen par pied de vigne dans les trois parcelles expérimentales (Aspiran, Cournonterral et Adissan) pour les saisons 2023-2024 et 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées.....	30
Figure 12. Diagrammes en barres présentant le poids de 50 baies dans les deux parcelles expérimentales (Aspiran et Cournonterral) pour la saison 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées.....	31
Figure 13. Diagrammes en barres présentant le rendement (en kg) par pied de vigne dans les deux parcelles expérimentales (Aspiran et Cournonterral) pour les saisons 2023-2024 et 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées.....	31
Figure 14. Évolution de la tensiométrie moyenne du sol sur le champ expérimental durant l'été 2025 en fonction des différents types de biochar utilisés et de la pluviométrie.....	32
Figure 15. Évolution de la tensiométrie moyenne du sol sur le champ expérimental durant l'été 2025 en fonction des différentes doses de biochar apportées et de la pluviométrie.....	33

Abréviations et sigles

CIVAM : Centre d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu Rural

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

IFV : Institut Français de la Vigne et du Vin

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

GIEE : Groupement d'Intérêt Economique et Environnemental

CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériels Agricoles

AB : Agriculture Biologique

AOC : Appellation d'Origine Contrôlée

SAU : Surface Agricole Utile

MO : Matière Organique

MOS : Matière Organique Stable

CEC : Capacité d'Echange Cationique

ETP : Évapo-Transpiration Potentielle

C : Carbone

IR : Inter-Rang

IC- Apex : Indice de Croissance des Apex / Indice de Stress Hydrique (Apex)

ANOVA : Analyse de la Variance

SNK : Student Newman Keuls

IC95 : Intervalle de Confiance à 95%

% : Pourcentage

°C : Degré Celsius

kg, t : kilogramme, Tonne

ha : hectare

mm, cm, m : millimètre, centimètre, mètre

cmol : centimole

kPa, cbar : kilopascal, centiBar

h : heure

1.Introduction

Ces dernières années, les changements climatiques mondiaux ont eu de graves répercussions sur le secteur agricole et notamment viticole. L'augmentation de la température moyenne de l'air et la multiplication des événements climatiques extrêmes sont devenues des sources majeures de préoccupation pour les viticulteurs (Genesio et al., 2015).

D'après le rapport du GIEC (2022), les vagues de chaleur et les périodes de sécheresse devraient augmenter en fréquence, en intensité et en durée dans la plupart des régions du monde, y compris dans certaines régions déjà exposées, particulièrement en Méditerranée. L'augmentation des températures (+0,9 à +5,6 °C à la fin du XXI^e siècle) couplée à la diminution des précipitations dans ces régions (de -4 % à -22 % selon les zones), va ainsi entraîner une réduction des ressources en eau souterraine et de surface ainsi qu'une augmentation de l'évapotranspiration des plantes (GIEC, 2022). La vulnérabilité des systèmes viticoles méditerranéens face aux pénuries d'eau devrait donc s'intensifier dans le futur. Depuis quelques années, une plus grande variabilité interannuelle des précipitations est d'ailleurs déjà observée et compromet grandement la stabilité des rendements. Cette situation, de plus en plus tendue, soulève alors de nombreux doutes sur les perspectives de rentabilité du secteur viticole (Baronti et al., 2022).

Dans ce contexte, la recherche et la mise en place de pratiques d'adaptation agroécologiques et innovantes deviennent primordiales. Notamment, certaines pratiques visant à améliorer la capacité d'infiltration et de rétention en eau des sols suscitent un intérêt croissant. Depuis peu, l'utilisation du biochar en agriculture est perçue comme un levier prometteur pour améliorer les propriétés du sol et réduire le stress hydrique des cultures (Pradhan et al., 2024 ; Baronti et al., 2014). Son utilisation est régulièrement couplée à un apport de compost afin d'obtenir des effets bénéfiques complémentaires. Le compost est ainsi majoritairement utilisé pour l'amélioration de l'état nutritionnel des cultures et le biochar pour ses effets positifs sur le stockage et l'infiltration de l'eau ainsi que pour la rétention des nutriments dans les sols (Liu et al., 2012 ; Fornes et al., 2024).

Ce mémoire a principalement pour but d'étudier l'intérêt que présente l'utilisation du biochar en région méditerranéenne, pour favoriser la disponibilité en eau du sol et limiter le stress hydrique chez la vigne. L'apport de compost étant une pratique d'ores et déjà développée par les viticulteurs du réseau CIVAM BIO 34, ce mémoire vise également à évaluer la pertinence d'un apport supplémentaire de biochar vis-à-vis d'un apport de compost seul.

Dans un premier temps, l'impact du stress hydrique sur la vigne et les pratiques visant à le limiter seront présentés. Les caractéristiques du biochar, liées à son processus de

production, seront ensuite détaillées. Enfin, les effets observés lors de plusieurs expérimentations visant à étudier l'impact du biochar sur l'état hydrique du sol et de la vigne, ainsi que sur la croissance et le rendement de cette culture, seront présentés dans la partie « État de l'art ». Dans un second temps, les protocoles expérimentaux mis en place dans le cadre de cette étude seront expliqués et détaillés dans la partie « Matériels et méthodes ». Les résultats obtenus sur les différentes variables mesurées ou suivies au cours de cette expérimentation seront ensuite présentés dans la partie « Résultats ». Enfin, la partie « Discussion » analysera ces résultats afin de répondre aux objectifs et problématiques identifiés.

2. État de l'art

2.1. Contexte climatique et viticole dans le département de l'Hérault

2.1.1. Contexte climatique dans la zone d'expérimentation

Le département de l'Hérault présente un climat méditerranéen. Il se caractérise par des hivers doux, des étés chauds et secs et parfois la présence d'épisodes pluvieux intenses autour de l'automne (épisodes cévenols). L'Occitanie, dont fait partie le département de l'Hérault, est l'une des régions françaises les plus exposées au réchauffement climatique. En effet, l'augmentation des températures y est plus importante (+2,1°C en Occitanie depuis 1900) qu'au niveau national (+1,7°C). Les épisodes de sécheresse, de canicule et d'inondation se multiplient et entraînent des impacts négatifs sur les milieux naturels, la sécurité alimentaire et la disponibilité des ressources, en particulier en eau (DREAL Occitanie, 2025). À titre d'exemple, la station météorologique de Montpellier-Aéroport indique des précipitations annuelles moyennes de 639 mm (période 1990-2020) et une ETP annuelle moyenne de 1250 mm, soulignant ainsi la présence de déficits hydriques dans le secteur.

2.1.2. La viticulture dans le département de l'Hérault

L'Hérault est le premier département viticole de la région Occitanie. La viticulture BIO y est également largement développée. Ainsi, 80 % des exploitations du département sont spécialisées en viticulture, les vignes occupent 45 % de la SAU et 17 % des surfaces viticoles sont en AB ou en conversion. Néanmoins, entre 2010 et 2020, le nombre de viticulteurs a diminué de 20 % et de nombreuses parcelles viticoles ont été abandonnées (-7 500 ha) (Agreste Occitanie, 2022). Cela témoigne des contraintes économiques et climatiques auxquelles les viticulteurs sont de plus en plus confrontés. Le recours à l'irrigation s'est d'ailleurs fortement développé. Les surfaces viticoles irriguées du département ont ainsi augmenté de 129 % entre 2010 et 2020 (Agreste Occitanie, 2022). Malgré une irrigation qui se développe fortement, les surfaces viticoles non irriguées restent cependant majoritaires dans le département (77 % en 2020). Les viticulteurs

doivent donc trouver des alternatives pour faire face à la multiplication et à l'intensification des périodes de sécheresse.

2.2. L'eau et la vigne

2.2.1. Besoins en eau et impact du stress hydrique sur la vigne

Pour compléter son cycle de croissance, les besoins en eau de la vigne se situent entre 300 et 700 mm (Medrano et al., 2015). Cependant, la durabilité de la viticulture est compromise en raison de l'augmentation considérable de cette culture dans divers environnements où les précipitations annuelles moyennes sont généralement inférieures aux besoins hydriques de la vigne (Medrano et al., 2015). En effet, presque deux tiers des zones viticoles mondiales reçoivent des précipitations annuelles totales inférieures à 700 mm, tandis qu'une grande partie se situe dans des régions où une sécheresse saisonnière coïncide souvent avec la saison de croissance de la vigne (Baronti et al., 2014). Malgré sa tolérance à la sécheresse, la vigne pourrait donc être de plus en plus affectée.

Les pénuries d'eau sont reconnues comme l'une des principales limitations environnementales pour la stabilité quantitative et qualitative de la production de raisin (Genesio et al., 2015). Le statut hydrique du sol, et par conséquent celui de la vigne, joue un rôle déterminant dans la croissance, le rendement et la qualité des baies de *Vitis vinifera* (L.) (Baronti et al., 2014). En effet, un stress hydrique prolongé peut avoir un impact négatif important sur le rendement de la vigne, en particulier dans les environnements méditerranéens secs (Baronti et al., 2014). Cette baisse de rendement lors de déficits hydriques s'explique notamment par une altération de la photosynthèse (Baronti et al., 2014), une diminution de la croissance des pousses (Lebon et al., 2006) et une réduction de la taille des baies (Gambetta et al., 2016). En période de sécheresse, les altérations de la photosynthèse liées au déficit hydrique du sol peuvent affecter négativement le bilan carboné de la plante entière (Baronti et al., 2022).

Outre le rendement, l'aspect qualitatif revêt également une importance particulière pour la viticulture. Les paramètres de qualité du raisin influencent considérablement la valeur de la production, délimitent le caractère distinctif d'un terroir et déterminent la notation d'une vendange par rapport à une autre (Genesio et al., 2015). Il a été démontré qu'un stress hydrique modéré pouvait, au contraire, améliorer certains paramètres qualitatifs du raisin (Genesio et al., 2015). La vigne produit alors des baies plus petites mais avec des niveaux plus élevés de sucre, d'anthocyanines et de tanins (Van Leeuwen et al., 2009). Néanmoins, bien que les stress hydriques modérés puissent constituer un avantage qualitatif, des conditions de stress excessif, notamment lorsque les sécheresses sont associées à des vagues de chaleur, ont un impact négatif direct sur la qualité du vin en provoquant une surmaturation, responsable d'un déséquilibre du ratio sucre/acidité (Hannah et al., 2013).

2.2.2. Pratiques agricoles et stratégies d'adaptation face aux déficits hydriques

La superficie viticole soumise à un déficit hydrique devrait encore augmenter dans un avenir proche (Flexas et al., 2010), risquant de provoquer un déplacement de la zone de compatibilité de la viticulture pour de nombreuses régions productrices et obligeant les viticulteurs à adopter des stratégies d'adaptation (Genesio et al., 2015).

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des stress hydriques conduit ainsi les vignerons à recourir davantage à l'irrigation (Chaves et al., 2007). Néanmoins, l'irrigation des cultures représente déjà environ 80 % de la consommation en eau douce disponible (Pradhan et al., 2024) et cela entre inévitablement en concurrence avec d'autres usages. L'irrigation est également connue pour avoir des impacts négatifs sur l'érosion du sol et sur la qualité des eaux souterraines. De plus, elle pourrait rester interdite dans de nombreuses zones AOC ou limitée aux situations d'urgence extrême (Genesio et al., 2015).

Dans ce contexte, l'identification et la mise en œuvre de mesures d'adaptation innovantes visant à renforcer la résilience des agroécosystèmes à la pénurie d'eau constituent une priorité essentielle pour maintenir à la fois la qualité et la quantité des productions viticoles mais également protéger les ressources en eau douce (Baronti et al., 2014).

Plusieurs pratiques, déjà utilisées par les viticulteurs, visent ainsi à limiter les pertes en eau par évapotranspiration (Medrano et al., 2014) : orientation des rangs et exposition des parcelles (Hunter et al., 2016) ; gestion fine de l'enherbement pour profiter des avantages fournis par le couvert sans mener à une compétition excessive pour l'eau (Lopes et al., 2011) ; sélection de cépages davantage adaptés à la sécheresse notamment via leur architecture foliaire (Tomás et al., 2014) et/ou de porte-greffes tolérants au stress hydrique et thermique (Serra et al., 2014 ; Tramontini et al., 2013) ; limitation de l'évaporation du sol grâce à la mise en place d'un paillage (Zhang et al., 2014).

D'autres pratiques, visant cette fois à améliorer le stockage de l'eau dans les sols (Medrano et al., 2014), peuvent également être envisagées. Il est largement admis que la capacité de rétention en eau peut être améliorée par l'augmentation de la teneur en matière organique des sols (Minasny et al., 2015). Plusieurs études soulignent notamment l'importance des amendements en compost sur les propriétés physiques du sol. Aggelides et al. (2000) ont ainsi mis en évidence de nombreux bénéfices suite à d'importants apports (de 40 à 160 t/ha). Dans leur étude, l'application de compost a permis de réduire la densité apparente, de créer de la porosité et d'augmenter la capacité de rétention en eau dans l'ensemble des traitements. D'autres études confirment ces résultats (Ramos, 2019). Le compost permettrait ainsi de favoriser la formation d'agrégats (Abiven et al., 2009), d'augmenter la capacité au champ et la quantité d'eau disponible

pour les plantes (Weber et al., 2007), d'améliorer la teneur en eau (Liu et al., 2012) et de favoriser l'infiltration de l'eau dans les sols (Brown et al., 2011).

En revanche, bien que le compost ait un impact positif sur les propriétés physiques et sur l'état hydrique des sols, l'ampleur de ses effets semble assez limitée. Ils varient en effet selon la dose appliquée et la texture du sol : les améliorations sont davantage marquées dans les sols à textures grossières qu'à textures plus fines et sont fortement dépendantes des quantités apportées (Aggelides et al., 2000 ; Brown et al., 2011 ; Minasny et al., 2015). De plus, l'amélioration des propriétés physiques du sol via l'apport de compost semble se limiter à de courtes périodes, notamment parce qu'elles sont liées au processus de minéralisation (Weber et al., 2007 ; Liu et al., 2012). Le maintien de ces bénéfices nécessite donc des apports réguliers et conséquents. Enfin, Minasny et al. (2015) montrent que l'augmentation de la teneur en MO des sols a en réalité un effet très limité sur l'augmentation de la teneur en eau : la réserve utile d'un sol augmenterait seulement, en moyenne, de 1,16 mm/100 mm de sol suite à un accroissement de 1 % de la teneur en MO.

L'utilisation du biochar suscite alors un intérêt croissant et apparaît comme un levier prometteur à explorer pour l'amélioration des capacités d'infiltration et de rétention de l'eau dans les sols agricoles. Il permettrait en effet d'améliorer ces caractéristiques de manière plus marquée et plus durable que le compost (Fornes et al., 2024).

2.3. L'utilisation du biochar en viticulture : une pratique innovante face aux enjeux hydriques actuels

C'est la redécouverte des Terra Preta amazoniennes vers les années 2000 qui a suscité un engouement scientifique autour de l'utilisation du biochar en agriculture. En effet, ces terres extrêmement fertiles sont riches en charbon et se caractérisent par des teneurs élevées en MOS et par une importante capacité de rétention en eau et en nutriments (Glaser et al., 2001).

2.3.1. Processus de production et caractéristiques du biochar

Le biochar se caractérise par une teneur élevée en carbone stable, une porosité et une surface spécifique importante, un pH alcalin compris entre 8 et 11 ainsi qu'une CEC élevée (Joseph et al., 2021).

C'est un matériau produit suite à un processus de pyrolyse de biomasse (Baronti et al., 2022). Le biochar est donc obtenu à partir de la conversion thermochimique de la biomasse, en l'absence ou dans un environnement à faible teneur en oxygène (Chiaramonti et al., 2024). Les conditions et les matières premières utilisées lors de ce processus de pyrolyse jouent un rôle primordial sur les caractéristiques finales du biochar, et par extension, sur l'intérêt de son utilisation en agriculture.

Suite à une pyrolyse de biomasse, on obtient toujours trois types de produits différents : un matériau solide carboné (le biochar), un pyrogaz et une biohuile. La proportion des produits solides, liquides et gazeux dépend des conditions de pyrolyse (vitesse principalement) et du type de matière première utilisé (Chiaramonti et al., 2024). La pyrolyse rapide vise à maximiser la phase liquide (biohuile), la gazéification vise à maximiser la phase gazeuse (pyrogaz) et la pyrolyse lente vise la production d'un matériau solide carboné (biochar) comme objectif principal (Chiaramonti et al., 2024).

La température utilisée lors du processus de pyrolyse s'avère également être un paramètre clé pour la production d'un biochar de qualité. Plus la température utilisée est forte, plus le pH, la porosité, la surface spécifique et la stabilité du biochar seront élevées. Une importante porosité et une grande surface spécifique sont des caractéristiques essentielles pour l'augmentation de la capacité de rétention en eau. En outre, une température élevée implique une perte plus importante de carbone initial, des pores plus petits (augmentation de la microporosité) et une teneur en cendres plus élevée (Lehman, 2007 ; Brewer et al., 2014). Bien que les pores de taille nanométrique soient importants pour les interactions chimiques, ils sont moins pertinents pour les questions liées à la disponibilité de l'eau, en raison de forces capillaires élevées retenant l'eau trop fortement pour que les plantes puissent la prélever (Brewer et al. 2014). Par ailleurs, une teneur en cendres trop élevée risque d'augmenter la salinité des sols créant ainsi un stress osmotique pour les cultures (Honvault et al., 2022). Plusieurs études montrent alors que les biochars produits à des températures de pyrolyse comprises entre 300 et 500°C présentent des propriétés particulièrement adaptées aux usages agricoles (Pradhan et al., 2022).

Outre les conditions de pyrolyse, les matières premières utilisées lors du processus influencent les caractéristiques du biochar. Il peut être produit à partir de matières ligneuses, de résidus alimentaires ou bien de boues. En 2018 dans le cadre du projet VINICHAR, l'IFV avec Jean-Christophe Payan, avait d'ailleurs étudié l'intérêt de la valorisation des marcs de raisins pour la production de biochar destiné à la viticulture. Plusieurs études ont comparé la qualité de différents types de biochars et la valorisation de matières premières ligneuses semble être la plus adaptée (Pradhan et al., 2024 ; Houben et al., 2017), notamment parce qu'elle permet d'obtenir une teneur en cendres moins importante (Puri et al., 2024). Au vu de la dynamique actuelle d'arrachage des vignes en région méditerranéenne, cela pourrait donc présenter un intérêt quant à la valorisation de ce type de biomasse ligneuse, généralement brûlée.

2.3.2. Intérêt du biochar sur le statut hydrique du sol

Du fait de sa porosité et de son importante surface spécifique, plusieurs études ont démontré l'intérêt du biochar, seul ou en mélange avec du compost, sur l'augmentation de la capacité de rétention en eau des sols. Glaser et al. (2002) ont ainsi constaté une augmentation de 18 % de la capacité au champ dans des Anthrosols riches en charbon

de bois. Une méta-analyse de Razzaghi et al. (2020) rapporte une augmentation moyenne similaire. Pradhan et al. (2024) ont montré qu'un apport de biochar permettait de retenir 20 % d'eau supplémentaire par rapport à un traitement témoin. Dans leur étude, ils soulignent l'effet positif de la porosité du biochar sur l'amélioration de la structure du sol, permettant ainsi de réduire le ruissellement, d'améliorer l'infiltration des eaux de pluie et de faciliter le développement racinaire des cultures (Pradhan et al., 2024).

Dans un vignoble non irrigué de Toscane (Italie centrale), de fortes applications de biochar (22 t/ha et 44 t/ha) ont entraîné une augmentation de la teneur en eau du sol (entre 3,2 et 4,5 %), une réduction du stress hydrique de la vigne (augmentation du potentiel hydrique foliaire de 24 à 37 %) et une augmentation de l'activité photosynthétique pendant les périodes de sécheresse (Baronti et al., 2014). Des années après la mise en place de cette expérimentation, de nouvelles analyses ont été réalisées sur cette même parcelle afin d'évaluer la durabilité des effets constatés initialement (Baronti et al., 2022). Ils ont alors montré que l'apport de biochar sur un sol sablo-argileux avait causé une amélioration significative de la teneur en eau, qui étaient encore détectables 10 ans après son application sur la modalité à 44 t/ha.

Une méta-analyse menée par Omondi et al. (2016) souligne en revanche l'importance de la dose utilisée : des apports de biochar supérieurs à 80 t/ha permettraient en moyenne une augmentation de 25 % de la capacité de rétention en eau, tandis que des doses inférieures à 20 t/ha ne produiraient qu'une augmentation de 10 %. La plupart des études rapportant une amélioration de la rétention en eau et de l'eau disponible pour les plantes ont en effet utilisé plus de 25 t/ha de biochar (Edeh et al., 2020 ; Xiao et al., 2016). Certaines études ont ainsi montré qu'un apport de 10 t/ha n'affectait pas la teneur en eau disponible (Xiao et al., 2016 ; Toková et al., 2020).

Quelques études ont étudié l'effet du biochar en mélange avec du compost. Fornes et al. (2024) ont comparé les effets d'une application de compost seul, de biochar seul et de leur mélange (10 % de biochar et 90 % de compost) sur les propriétés du sol d'un verger d'oliviers. Les modalités « Biochar seul » et « Mélange Compost-Biochar » se sont révélées être les plus efficaces pour l'amélioration des propriétés physiques du sol (densité apparente, porosité totale, aération, capacité de rétention en eau), en particulier dans la couche superficielle 0-5 cm.

De la même manière, Liu et al. (2012) ont comparé cinq traitements (témoin, compost seul et trois mélanges compost [30 t/ha] + biochar [de 5 à 20 t/ha]) et ont mis en évidence une augmentation de la teneur en eau du sol selon l'ordre suivant : témoin < compost < mélange compost + biochar. Le traitement avec la plus forte dose de biochar (Compost 30 t/ha + Biochar 20 t/ha) a entraîné la teneur en eau du sol la plus élevée. L'ajout de biochar et de compost au sol a également permis d'augmenter la capacité de rétention en eau disponible pour les plantes, passant de 6 % dans le témoin à 12 % dans le traitement Compost (30 t/ha) + Biochar (20 t/ha). Ces deux études soulignent ainsi le rôle

prépondérant du biochar vis-à-vis du compost quant à l'amélioration des caractéristiques hydriques des sols.

L'ensemble de ces résultats suggèrent qu'une application de biochar dans les vignobles, avec ou sans compost, semble être une stratégie d'adaptation pertinente pour améliorer la capacité de rétention et la teneur en eau des sols. L'intensité et la durabilité des effets semblent cependant dépendre de la dose de biochar apportée. Des doses importantes de biochar pourraient permettre de conserver un impact intéressant sur du moyen voire du long terme (Baronti et al., 2022) mais des doses plus faibles pourraient n'avoir aucun effet (Edeh et al., 2020).

2.3.3. Intérêt du biochar sur la croissance et la productivité de la vigne

Au-delà d'une amélioration des propriétés physiques du sol, le biochar semble également jouer un rôle positif sur les composantes chimiques et biologiques. Suite à son oxydation, de nombreux groupes fonctionnels apparaissent à sa surface, permettant ainsi d'augmenter la CEC du sol et d'améliorer la rétention des nutriments (Pradhan et al., 2024 ; Sohi et al., 2010). Etant un matériau alcalin (pH entre 8 et 11), le biochar peut également être utilisé pour rehausser le pH des sols acides et permettre une meilleure disponibilité des nutriments, notamment du phosphore (Houben et al., 2017). Enfin, la porosité du biochar fournit de nombreux habitats pour les micro-organismes, permettant d'augmenter la biomasse microbienne et de favoriser la diversité fonctionnelle présente dans les sols (Lehmann et al., 2011).

Grâce à ces effets combinés sur les composantes physiques, chimiques et biologiques, il semble que son utilisation permette d'augmenter la fertilité des sols et, par conséquent, la croissance et le rendement des cultures. Une méta-analyse visant à quantifier l'effet du biochar sur la productivité des cultures a ainsi conclu à une augmentation moyenne d'environ 10 % sur le rendement (Jeffery et al., 2011).

Dans le vignoble non irrigué de Toscane, des mesures de rendements ont également été réalisées durant les 4 années qui ont suivi l'application du biochar. Les parcelles amendées ont présenté une augmentation du rendement au cours de l'ensemble des années suivies, allant de +16 % à +66 % par rapport au témoin (Genesio et al., 2015). Ils soulignent que cette augmentation de rendement n'était pas due à un nombre plus important de grappes par pied de vigne, mais à des baies significativement plus grosses dans les traitements avec biochar (Genesio et al., 2015). Par ailleurs, cet effet a été davantage marqué lors des années présentant les plus faibles précipitations, confortant ainsi l'idée d'un effet positif du biochar sur la disponibilité en eau durant les périodes les plus sèches. Enfin, aucun impact sur les paramètres clés de la qualité du raisin n'a été observé (Genesio et al., 2015).

Outre le rendement, le biochar pourrait également permettre d'améliorer la croissance des jeunes vignes. Le Domaine Lafage, situé à Perpignan, expérimente depuis quelques années l'utilisation du biochar en viticulture. Ils ont ainsi pu constater une augmentation de +70 % de la croissance des rameaux sur un plantier amendé avec seulement 4 t/ha de

biochar. Ces résultats sont donc prometteurs quant aux bénéfices que pourrait fournir l'amendement en biochar, même à des doses relativement faibles.

2.3.4. Limitations de l'utilisation du biochar selon le contexte pédoclimatique et les conditions expérimentales

Les nombreux avantages que pourrait présenter l'utilisation du biochar en viticulture, particulièrement afin de répondre aux enjeux hydriques actuels, ont été énumérés mais il est important de préciser que le contexte pédoclimatique et les conditions d'expérimentation jouent un rôle majeur dans les résultats obtenus. L'interaction entre le sol, les cultures et l'application de biochar peut être positive ou négative, en fonction de plusieurs facteurs agronomiques tels que les conditions climatiques locales, le type de sol, les propriétés physico-chimiques du biochar ou son taux d'application (Lehmann et al., 2021 ; Omondi et al., 2016 ; Jeffery et al., 2011).

La méta-analyse menée par Jeffery et al. (2011) montre que le biochar tend à améliorer le rendement des cultures principalement lorsqu'il est appliqué sur des sols acides et en contexte tropical. Cette étude souligne que sur des sols alcalins, les résultats peuvent même être négatifs. En région tempérée, les résultats sont globalement neutres mais peuvent présenter des effets positifs en conditions sèches. La dose de biochar utilisée influence également fortement les résultats expérimentaux obtenus (Omondi et al., 2016 ; Jeffery et al., 2011 ; Baronti et al., 2022). Enfin, la texture du sol constitue un autre paramètre clé pouvant jouer grandement sur l'efficacité du biochar. En effet, l'utilisation du biochar sur des sols à texture grossière permettrait d'augmenter la teneur en eau disponible de 45 %, tandis qu'il l'augmenterait seulement de 14 % pour les sols à texture fine (Razzaghi et al., 2020).

Le sujet est encore très peu exploré et la majorité des études portant sur le biochar traitent principalement de son importante teneur en C stable et du potentiel d'atténuation du changement climatique qui en découle compte tenu de sa persistance dans les sols durant des décennies voire des siècles (Baronti et al., 2022). Il est donc crucial de poursuivre et d'enrichir les recherches sur son rôle dans l'amélioration de l'état hydrique des sols et des cultures afin d'appréhender toute la complexité liée à l'utilisation du biochar sur cette thématique.

Les expérimentations réalisées en conditions réelles, et notamment sur cultures pérennes comme la vigne, restent rares. Beaucoup se limitent ainsi à l'étude de cultures annuelles ou à des essais en pots sous conditions contrôlées. Ensuite, même si l'effet dose du biochar est largement documenté dans la littérature scientifique, les quantités apportées et testées sont souvent très élevées compte tenu du prix d'achat actuel du biochar (environ 1000 €/t). Il semble donc essentiel d'évaluer les effets à des doses plus faibles, financièrement envisageables pour les viticulteurs. Enfin, la majorité des études se concentre sur des effets à court terme. Cependant, compte tenu de l'importante stabilité du biochar dans les sols et de son évolution au cours du temps, des évaluations

à long terme seraient pertinentes, notamment dans le cadre d'expérimentations sur cultures pérennes.

3. Contexte du stage

3.1. Expérimentations menées par le CIVAM BIO 34

Le CIVAM BIO 34 est une association loi 1901 qui accompagne divers acteurs (agriculteurs, société civile et institutions) dans la transition vers une agriculture durable et une alimentation plus saine. Son action se déploie à différentes échelles, aussi bien au niveau des exploitations qu'au niveau des territoires, à travers la mise en place d'expérimentations sur fermes, l'organisation de formations, la sensibilisation du grand public et la participation à divers projets territoriaux.

Dans le cadre de la promotion et de la recherche de pratiques agroécologiques adaptées au climat méditerranéen, le CIVAM BIO 34 a lancé des expérimentations portant sur l'utilisation de mélanges Compost-Biochar en viticulture. Ce projet s'inscrit dans le cadre d'un groupe 30 000 et répond à la nécessité croissante des viticulteurs BIO du territoire de trouver des solutions pour le maintien de leur activité tout en diminuant leur consommation en intrants et leur dépendance à l'eau d'irrigation. L'amélioration de la résilience des exploitations viticoles face aux changements climatiques actuels et à venir constitue également un objectif central. Ces expérimentations seront menées et suivies sur une période minimale de 3 ans. Ayant débuté durant l'année 2024, ce mémoire s'attache à étudier les résultats obtenus au cours des saisons 2023-2024 et 2024-2025. Des expérimentations relativement similaires sont conduites en parallèle par le CIVAM BIO 66 et le BIO CIVAM 11.

3.2. Problématique et objectifs

La problématique de ce mémoire est la suivante :

Un amendement en Compost-Biochar permet-il d'augmenter la disponibilité en eau des sols et de diminuer le stress hydrique de la vigne en contexte méditerranéen ?

Des sous-problématiques s'ajoutent : *Dans quelle mesure un apport supplémentaire de biochar est bénéfique vis-à-vis d'un apport de compost seul ? Quel type de biochar est le plus performant pour ces effets ? Quelle dose de biochar permet d'optimiser ces effets ?*

Ces questions débouchent sur trois objectifs distincts :

Objectif n°1 : Évaluer l'effet d'un amendement Compost-Biochar sur la disponibilité et l'infiltration de l'eau dans les sols, ainsi que sur le stress hydrique et le rendement de la vigne.

Pour répondre à cet objectif, une modalité « Témoin » non amendée sera comparée à une modalité « Compost-Biochar ». La tensiométrie du sol, la vitesse d'infiltration de l'eau, la dynamique des apex, le nombre de grappes par pied de vigne ainsi que le rendement et le poids de 200 baies seront mesurés et suivis.

- ➔ *Hypothèses : En accord avec l'état de l'art, la modalité « Compost-Biochar » devrait présenter une meilleure disponibilité et infiltration de l'eau dans les sols (tensiométrie plus faible et vitesse d'infiltration plus élevée), un stress hydrique moins marqué (IC-Apex plus élevé) et un rendement plus élevé (notamment via l'augmentation du poids des baies). Le nombre de grappes pourrait également être favorisé par une réduction du stress hydrique, bien que les études existantes n'aient pas montré de différences significatives.*

Objectif n°2 : Évaluer l'intérêt que représente un apport supplémentaire de biochar comparé à un apport de compost seul, pratique d'ores et déjà utilisée par les viticulteurs du réseau CIVAM BIO 34.

Pour répondre à cet objectif, une modalité « Compost seul » sera comparée à la modalité « Compost-Biochar ». Les mêmes variables que précédemment seront mesurées et suivies.

- ➔ *Hypothèse : En accord avec l'état de l'art, l'ajout de biochar devrait permettre d'obtenir de meilleurs résultats, particulièrement sur les propriétés physiques du sol (capacité de rétention, disponibilité et infiltration de l'eau dans les sols).*

Objectif n°3 : Étudier l'effet du type et de la dose de biochar sur la capacité de rétention en eau des sols.

Pour répondre à cet objectif quatre biochars différents seront comparés. L'ensemble de ces biochars sont issus de matières premières ligneuses mais leurs caractéristiques finales diffèrent tout de même. Pour chaque type de biochar, deux doses différentes seront également comparées.

- ➔ *Hypothèses : En accord avec l'état de l'art, les biochars présentant les porosités et les surfaces spécifiques les plus importantes devraient améliorer le plus fortement la capacité de rétention en eau du sol. Toujours en accord avec l'état de l'art, l'effet devrait être davantage prononcé avec la dose la plus élevée.*

4. Matériels et Méthodes

Les expérimentations portant sur l'intérêt du mélange Compost-Biochar, ainsi que sur sa comparaison avec un apport de compost seul, ont été menées sur des parcelles viticoles. En revanche, l'expérimentation visant à comparer les performances de différents types et de différentes doses de biochar a été conduite sur une parcelle de champ. La partie « Matériels et Méthodes » sera donc découpée en deux sous-parties : « Expérimentations sur parcelles viticoles » et « Expérimentation sur champ ».

Dans ce mémoire, une « saison » correspond à la période allant de septembre de l'année n à septembre de l'année n+1.

4.1. Expérimentations sur parcelles viticoles

4.1.1. Description des parcelles expérimentales

Cette expérimentation s'est déroulée sur trois exploitations viticoles situées dans le département de l'Hérault, en région méditerranéenne, dans le sud de la France. Toutes ces exploitations sont en AB et les parcelles utilisées ne sont pas irriguées. La première parcelle se situe dans la commune de Cournonterral, la seconde dans la commune d'Aspiran et la troisième dans la commune d'Adissan. L'expérimentation a débuté au cours de l'année 2024 pour les deux premières exploitations (Cournonterral et Aspiran). Les données traitées concernent donc les saisons 2023-2024 et 2024-2025. La dernière exploitation (Adissan) a rejoint le projet au cours de l'année 2025. Seule la saison 2024-2025 a donc été étudiée.

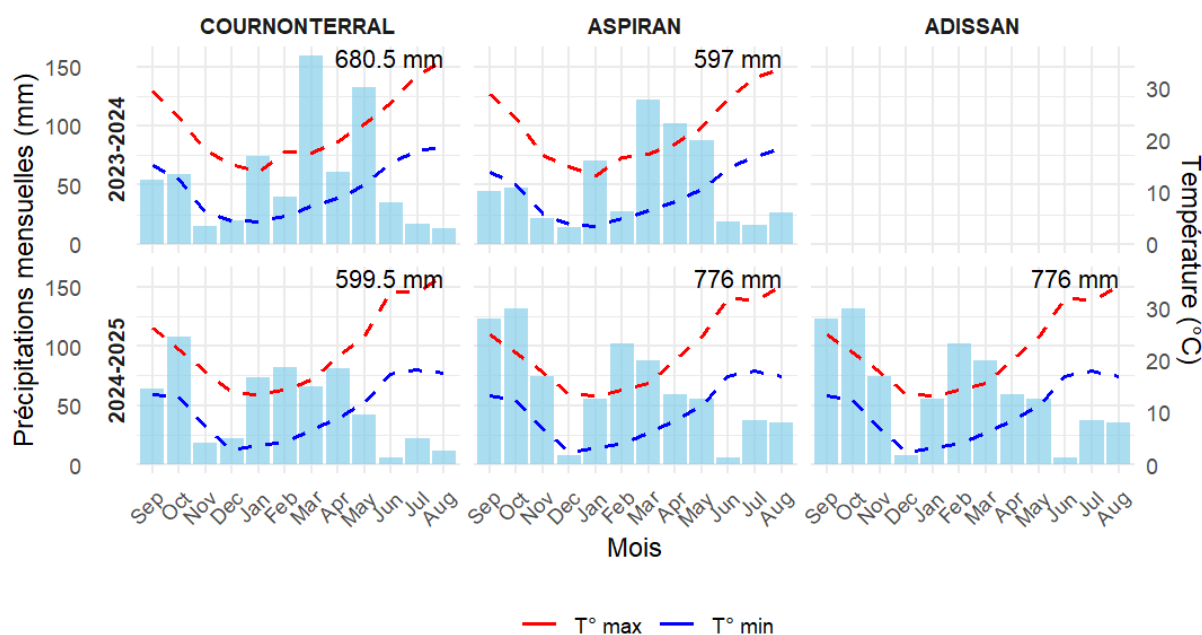


Figure 1. Diagrammes ombrothermiques pour les trois sites expérimentaux (Cournonterral, Aspiran et Adissan) et sur les deux saisons d'expérimentation (2023-2024 et 2024-2025). La ligne en pointillés bleue indique la température mensuelle minimale (en °C), tandis que la ligne en pointillés rouge indique la température mensuelle maximale (en °C). Les barres bleues représentent le cumul des précipitations mensuelles (en mm). Le total des précipitations sur la saison viticole (de septembre à septembre) est indiqué en haut à droite de chaque graphique. Les données présentées pour la parcelle de Cournonterral proviennent de la station météorologique de Fabrègues, tandis que celles présentées pour les parcelles d'Aspiran et d'Adissan proviennent de la station météorologique de Plaissan.

Les conditions climatiques (pluviométrie et température) pour chacun des sites expérimentaux et pour les deux saisons étudiées sont présentées dans les diagrammes ombrothermiques (Figure 1). Sur le site de Cournonterral, la pluviométrie totale a été plus élevée lors de la saison 2023-2024 (680 mm) que lors de la saison 2024-2025 (599 mm),

notamment pendant les mois de mars, mai et juin. À l'inverse, sur le site d'Aspiran, la pluviométrie totale a été plus importante durant la saison 2024-2025 (776mm) que durant la saison 2023-2024 (597 mm), notamment pendant les mois de septembre, octobre, novembre et février.

Les parcelles étudiées diffèrent également par leurs cépages, leur âge, leur densité de plantations et leurs conditions pédologiques. Leurs caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques des parcelles expérimentales

	COURNONTERRAL <i>Nicolas GUIZARD</i>	ASPIRAN <i>Julien PEYRAS</i>	ADISSAN <i>Frédéric SALBAT</i>
Cépage	Marselan Noir	Cinsault Noir	Grenache Blanc
Porte-Greffe	SO 4	?	110 R
Age de la Vigne	8 ans	52 ans	3 ans (Plantier)
Densité de Plantation	2,25 m x 0,9 m	2 m x 1 m	2,25 m x 0,9m
Texture du Sol	Limono-Sablo-Argileux Argiles : 16 % , Limons : 57 % , Sables : 26 %	Limono-Argilo-Sableux Argiles : 30 % , Limons : 41 % , Sables : 30 %	Argilo-Limono-Sableux Argiles : 36 % , Limons : 46 % , Sables : 18 %
pH (eau) Sol	8,4	8,5	8,4
MO Sol	2,3 %	2,4 %	1,1 %
CEC Metson Sol	10,5 cmol/kg	14,5 cmol/kg	17,5 cmol/kg

4.1.2. Modalités expérimentales étudiées

Les expérimentations ont débuté le 25 avril 2024 pour les parcelles de Cournonterral et d'Aspiran, et le 23 avril 2025 pour la parcelle d'Adissan.

Trois modalités communes ont été mises en place sur l'ensemble des parcelles (Figure 2) :

- Aucun amendement (T0)
- Compost seul (COMP)
- Compost-Biochar LABIN® 2 t/ha (CBr)

Sur la parcelle d'Adissan, une quatrième modalité a également été ajoutée. Une double dose de biochar y a, en effet, été testée : Compost-Biochar LABIN® 4 t/ha (CBrDD).

Le compost et le biochar ont été épandus en plein, sur l'ensemble des inter-rangs. Un passage de disques a ensuite été réalisé afin de les enfouir légèrement (0-20 cm de profondeur). Dans chaque parcelle, trois tensiomètres par modalité ont été installés. Par ailleurs, quatre placettes par modalité, comprenant chacune cinq ceps de vignes, ont été identifiées et marquées à l'aide de rubalise (Figure 2).

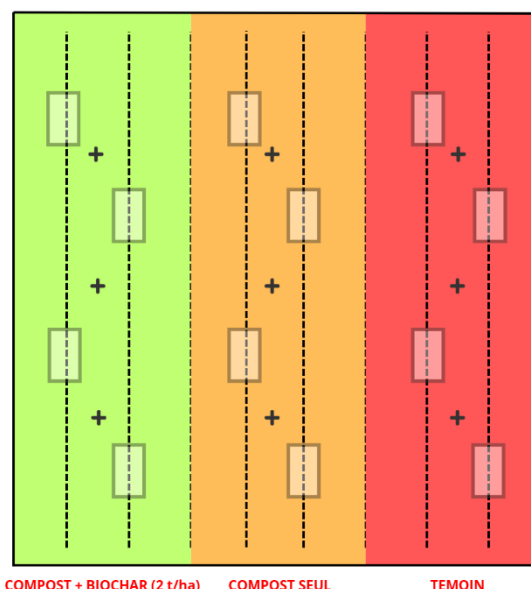


Figure 2. Schéma expérimental global mis en place sur les parcelles viticoles. Vert = Compost + Biochar LABIN® (2 t/ha) ; Orange = Compost seul ; Rouge = Témoin (Aucun amendement). Les lignes pointillées représentent l'emplacement des rangs de vignes, les croix indiquent l'emplacement des tensiomètres et les rectangles transparents celui des placettes.

Ces expérimentations étant menées directement sur les parcelles des viticulteurs, il a été nécessaire de tenir compte de leurs pratiques, de leurs choix et de leurs contraintes. Cela se traduit toutefois par un contrôle plus limité, la présence d'un certain nombre de biais, et une homogénéité expérimentale compliquée à atteindre entre les différentes parcelles. Ainsi, la dose et le type de compost apportés, l'agencement spatial des modalités et la présence de couverts semés ou spontanés varient d'une parcelle à l'autre (Tableau 2).

Pour la parcelle de Cournonterral, un apport de 10 t/ha de compost de déchets verts a été réalisé en 2024. Sur la saison 2023-2024, le viticulteur avait semé un couvert temporaire sur l'intégralité des inter-rangs. En revanche, sur la saison 2024-2025 il a semé un couvert temporaire seulement un inter-rang sur deux, l'autre étant laissé en couvert spontané. Sur les deux saisons étudiées, les tensiomètres étaient placés sur des inter-rangs semés.

Il convient également de souligner la présence d'une hétérogénéité spatiale sur cette parcelle, liée à une très légère pente orientée du sud vers le nord. Par ailleurs, la modalité T0 est située en bordure nord de parcelle et est accolée à un mur de voisinage qui semble

visuellement créer une humidité plus importante via la rétention des eaux de ruissellement.

Pour la parcelle d'Aspiran, un total de 20 t/ha de compost a été apporté au cours des deux saisons étudiées. En 2024, le viticulteur a épandu 12 t/ha de compost (8 t/ha de compost de fumier d'ovins + 4 t/ha de compost de déchets verts) sur l'intégralité des inter-rangs. En 2025, 8 t/ha de compost supplémentaire ont été apportés, mais seulement un inter-rang sur deux. L'inter-rang sur lequel étaient placés les tensiomètres de la modalité « Compost seul » a donc reçu, sur les deux années, une quantité plus importante de compost que l'inter-rang sur lequel étaient placés les tensiomètres de la modalité « Compost-Biochar ».

Sur les inter-rangs de la parcelle d'Aspiran, la présence de couverts, majoritairement spontanés, est permanente et le sol est très rarement travaillé. Ainsi, durant la saison 2023-2024, un couvert spontané permanent a été maintenu sur l'intégralité des inter-rangs. En revanche, sur la saison 2024-2025, un couvert a exceptionnellement été semé un inter-rang sur deux, l'autre inter-rang étant laissé en couvert spontané. Sur la première saison étudiée, l'ensemble des tensiomètres étaient placés sur des inter-rangs spontanés. En revanche, sur la seconde saison étudiée, seuls les tensiomètres de la modalité « Compost-Biochar » étaient sur un inter-rang spontané, tandis que les tensiomètres des deux autres modalités se trouvaient sur des inter-rangs semés. Sur cette même saison, un développement inégal des couverts a été observé, avec une biomasse plus importante pour le couvert spontané que pour le couvert semé (Annexe 1). De plus, le semis du couvert a impliqué un léger travail du sol sur les inter-rangs concernés, dans une parcelle habituellement non travaillée qui se caractérise par un sol plutôt compacté.

Il convient également de souligner que la vigne est âgée de 52 ans et que cette parcelle présente de nombreux manquants, notamment à proximité de certaines placettes ou de certains tensiomètres. Une hétérogénéité spatiale est également présente, avec une légère pente orientée du nord vers le sud. Là encore, la modalité T0 est située en bordure de parcelle. Enfin, le biochar n'a pas réellement été enfoui et est resté relativement en surface sur cette parcelle, en raison d'un sol tassé et déjà trop sec n'ayant pas permis aux outils de pénétrer.

Pour la parcelle d'Adissan, un apport de 9 t/ha de compost de déchets verts a été réalisé en 2025. Sur la saison 2024-2025, le viticulteur a semé un couvert temporaire un inter-rang sur deux, tandis que l'autre inter-rang a été laissé en couvert spontané temporaire. L'ensemble des tensiomètres ont été placés sur des inter-rangs spontanés. Il convient également de préciser que les tensiomètres utilisés ici ont été récupérés sur d'anciennes parcelles expérimentales : bien qu'ils aient été vérifiés avant leur installation, il est difficile d'évaluer leur état d'usure exact.

Tableau 2. Description des spécificités expérimentales propre à chacune des parcelles.

	COURNONTERRAL <i>Nicolas GUIZARD</i>	ASPIRAN <i>Julien PEYRAS</i>	ADISSAN <i>Frédéric SALBAT</i>
Surface expérimentale totale	0,25 ha	0,1 ha	0,2 ha
Agencement spatial des modalités	CBr – COMP – T0	COMP – CBr – T0	CBrDD – CBr – COMP – T0
Dose de compost	10 t/ha	Saison 1 : 12 t/ha Saison 2 : 8 t/ha	9 t/ha
Date d'épandage du compost	15/04/2024	15/04/2024 + 01/03/2025	10/04/2025
Type de compost	Compost de Déchets Verts	Saison 1 : Compost de Fumier d'Ovins (8 t/ha) + Compost de Déchets Verts (4 t/ha) Saison 2 : Compost de Fumier de Cheval (8 t/ha) – Seulement 1 IR sur 2 (IR des tensiomètres COMP)	Compost de Déchets Verts
Dose de biochar	2 t/ha	2 t/ha	1 ^{ère} Modalité: 2 t/ha 2 ^{ème} Modalité: 4 t/ha
Date d'épandage du biochar	25/04/2024	25/04/2024	23/04/2025
Type de biochar	LABIN®	LABIN®	LABIN®
Type de Couvert présent sur l'IR des tensiomètres	Saison 1 : Semé Saison 2 : Semé	Saison 1 : Spontané Saison 2 : Spontané sur CBr / Semé sur COMP et T0	Saison 2 : Spontané

Des cartographies présentant le design expérimental détaillé et spécifique à chacune des parcelles sont disponibles en Annexe 2.

4.1.3. Mesures et suivis réalisés sur les parcelles

Mesures relatives à l'état du sol

Suivis de la tensiométrie du sol. Pour chaque modalité étudiée, trois sondes tensiométriques WATERMARK® ont été installées au centre de l'inter-rang, à 40 cm de

profondeur. Cette profondeur a été choisie afin d'être représentative de la zone exploitée par les racines de la vigne, puisqu'environ 80 % du système racinaire se trouve dans les 60 premiers cm de sol (Lanari et al., 2025). Les tensiomètres permettent de mesurer le potentiel hydrique du sol, renseignant ainsi sur la disponibilité en eau pour la vigne. Les valeurs tensiométriques ont été relevées une fois par semaine durant le printemps et l'été.

La plage de valeurs mesurée par les sondes WATERMARK® s'étend de 0 à -199 kPa (ou cBar). L'appareil n'est pas capable de mesurer au-delà. La vigne, quant à elle, est capable de prélever de l'eau jusqu'à un potentiel hydrique foliaire de -1,5 MPa (soit -1500 kPa), correspondant au point de flétrissement permanent pour la plupart des cultures (Van Leeuwen et al., 2009). Le stress hydrique de la vigne est donc généralement estimé via le potentiel hydrique foliaire : un léger stress survient lorsque le potentiel de base est inférieur à -0,2 MPa (-200 kPa) et un stress sévère est atteint pour des valeurs inférieures à -0,8 MPa (-800 kPa) (Van Leeuwen et al., 2009 ; Deloire et al., 2006). Le potentiel hydrique du sol permet d'approcher le potentiel hydrique foliaire de base bien que le second soit généralement plus faible car le flux transpiratoire n'est pas totalement nul (Saurin et al., 2014). Ainsi, le Tableau 3 présente les seuils utilisés pour évaluer la contrainte hydrique de la vigne à partir des valeurs tensiométriques (ou potentiel hydrique du sol) relevées dans cette étude.

Tableau 3. Interprétation des valeurs tensiométriques (ou potentiel hydrique du sol Ψ_{sol}) sur la contrainte hydrique subie par la vigne (Gelé L, 2023).

Absence de contrainte	$0 > \Psi_{sol} > -50 \text{ kPa}$
Contrainte très faible	$-50 \text{ kPa} > \Psi_{sol} > -80 \text{ kPa}$
Contrainte faible	$-80 \text{ kPa} > \Psi_{sol} > -150 \text{ kPa}$
Contrainte faible à modérée	$-150 \text{ kPa} > \Psi_{sol} > -250 \text{ kPa}$
Contrainte forte	$-250 \text{ kPa} > \Psi_{sol}$

Tests de Beerkan. Le test de Beerkan (méthode Biofunctool® - Rakotondrazafy et al., 2024) permet de mesurer la vitesse d'infiltration de l'eau dans les sols (en mm/h). Il consiste à simuler dix pluies consécutives de 10 mm chacune et à mesurer, pour chaque répétition, le temps nécessaire pour que l'eau s'infiltre complètement dans le sol. Ce test fournit ainsi une indication sur la capacité d'infiltration d'un sol, influencée par différents facteurs tels que la structure, la texture, le taux de cailloux ou l'enherbement. Ces tests ont été réalisés le 22 mai 2025, uniquement durant la saison 2024-2025. En se plaçant au centre des inter-rangs, trois répétitions par modalité ont été effectuées.

Activité biologique du sol. Pour la saison 2023-2024, le test du « slip en coton » a été mis en place, avec trois répétitions par modalité. Les slips ont été enterrés au centre des inter-rangs, entre 20 et 30 cm de profondeur, pendant environ un mois (mai-juin). Un score de dégradation, allant de 1 à 5, leur a ensuite été attribué. Lors de la saison 2024-2025, c'est le test SituResp (méthode Biofunctool® - Rakotondrazafy et al., 2024) qui a été utilisé afin

de mesurer la respiration basale du sol. Cinq prélèvements de sol par modalité ont alors été effectués dans l'horizon de surface (0-20 cm de profondeur) puis analysés en laboratoire. Les résultats de ces tests sont présentés en Annexe 3.

Mesures relatives à l'état de la vigne

Suivis des apex. La méthode des apex (Pichon et al., 2021) permet de suivre la dynamique d'arrêt de croissance des vignes et d'estimer ainsi leur niveau de contrainte hydrique. Pour chaque date de relevé et pour chaque modalité étudiée, l'observation des apex a été réalisée sur 50 ceps de vignes, de manière aléatoire. A partir de ces observations, l'application « Apex Vigne » calcule un indice de croissance (IC-Apex), aussi appelé indice de stress hydrique, permettant de caractériser l'état hydrique des vignes : plus l'IC-Apex est proche de 0, plus cela signifie que la vigne est stressée. Pour la saison 2023-2024, un unique IC-Apex a été calculé par date et par modalité à partir des 50 observations. Lors de la saison 2024-2025, 5 répétitions de 10 observations ont été effectuées, donnant ainsi cinq IC-Apex par date et par modalité. Les relevés ont été réalisés une fois tous les 15 jours, à partir de la floraison et jusqu'à rognage et/ou écimage des vignes.

Nombre de grappes, poids des baies et rendement final. L'état hydrique des vignes influence fortement le rendement final, notamment via le nombre de grappes (défini sur l'année n-1) et le poids des baies (défini sur l'année n), qui sont des composantes clés du rendement. La présence d'un déficit hydrique entre le débourrement et la véraison de l'année n-1 peut ainsi limiter l'initiation et la différenciation des inflorescences, entraînant un nombre de grappes réduit l'année suivante. De la même manière, la présence d'un déficit hydrique entre la nouaison et la vendange de l'année n, peut freiner la formation et le remplissage des baies, affectant négativement leur poids final (Guilpart N, 2014).

Dans chaque modalité, 4 placettes, comportant chacune 5 ceps de vigne, ont été définies. Le nombre de grappes a été compté pour chaque cep, menant à un total de 20 observations par modalité. Ces mesures ont été réalisées en mai 2024 et en juillet 2025, l'année 2024 servant donc de référence.

Le poids de 200 baies, récoltées aléatoirement sur chacune des modalités, a été mesuré lors des vendanges de 2024 et de 2025. Pour la saison 2023-2024, aucune répétition par modalité n'a été effectuée. En revanche, pour la saison 2024-2025, le poids de 200 baies a été obtenu en pesant 4 lots de 50 baies. Pour chaque modalité, il y a donc 4 répétitions du poids de 50 baies mais toujours une seule répétition pour le poids de 200 baies.

Enfin, les vendanges ont été réalisées sur l'ensemble des placettes expérimentales. Pour la saison 2023-2024, le rendement en raisins a été pesé par placette, puis ramené à un rendement moyen par pied de vigne. Pour chaque modalité, 4 répétitions du rendement par placette, ramené ensuite par pied de vigne, ont ainsi été obtenus. Pour la saison 2024-

2025, chaque pied de vigne présent au sein d'une placette a été pesé individuellement. C'est donc directement le rendement par pied de vigne qui a été mesuré, en ayant cette fois 20 répétitions par modalité.

Poids des sarments. Le poids des sarments est utilisé comme un indicateur de la vigueur de la vigne. Pour chaque placette, les sarments ont été taillés et pesés. Un total de 4 répétitions par modalité a alors été effectué. Cette mesure a été réalisée le 15 décembre 2023, avant le début des expérimentations, puis le 11 février 2025, à l'issue de la première saison d'expérimentation. La première mesure sert ainsi de référence. À noter que la mesure de 2023 a néanmoins été perdue pour la parcelle de Cournonterral. Les résultats de ces mesures sont présentés en Annexe 4.

Un tableau de synthèse permettant de recenser l'ensemble des dates et des périodes sur lesquelles les mesures ou suivis ont été réalisés durant les deux années d'expérimentations et pour chacune des parcelles expérimentales est disponible en Annexe 5.

4.2. Expérimentation sur champ

En parallèle, une autre expérimentation portant uniquement sur l'étude du biochar a été mise en place le 19 juin 2025 sur une parcelle de champ située dans la commune d'Adissan.

4.2.1. Description des biochars utilisés

Quatre biochars différents ont été utilisés (Photo 1) :

- Biochar LABIN®
- Biochar Terra Fertilis®
- Biochar MIRAÏA®
- Biochar produit par le GIEE Vignes Vertes et Méditerranée (GIEE VVM)

Ces quatre biochars sont obtenus à partir de matières premières ligneuses. Le biochar LABIN®, utilisé sur les parcelles viticoles expérimentales, est un biochar fabriqué en Espagne et s'avère être le moins coûteux du marché (700 €/t). Néanmoins, très peu d'informations sont disponibles sur son processus de fabrication et sur ses caractéristiques. Le biochar Terra Fertilis® possède une importante surface spécifique (400 m²/g) et un taux très élevé en C (93,9 %), mais s'avère être extrêmement coûteux (4 600 €/t). Le biochar MIRAÏA® est produit à Toulouse, en France, et son prix avoisine celui du LABIN® (850 €/t). Il présente une surface spécifique de 140 m²/g et une teneur en C de 82,9 %. Le biochar du GIEE Vignes Vertes et Méditerranée est produit localement (commune de Quarante dans le département de l'Hérault). Le GIEE VVM rassemble en effet plusieurs viticulteurs héraultais qui ont acquis récemment un four à biochar Kon-Tiki® en CUMA. À l'aide de ce four et à partir de souches de vignes arrachées, ils

produisent eux-mêmes leur propre biochar. Ce biochar a été envoyé au laboratoire pour analyse, les résultats devraient donc être disponibles prochainement. Enfin, les biochars LABIN® et Terra Fertilis® se caractérisent tous deux par une granulométrie très faible (0-2 mm) et se différencient des biochars MIRAÏA® et GIEE VVM qui présentent, eux, une granulométrie bien plus élevée (0-50 mm).

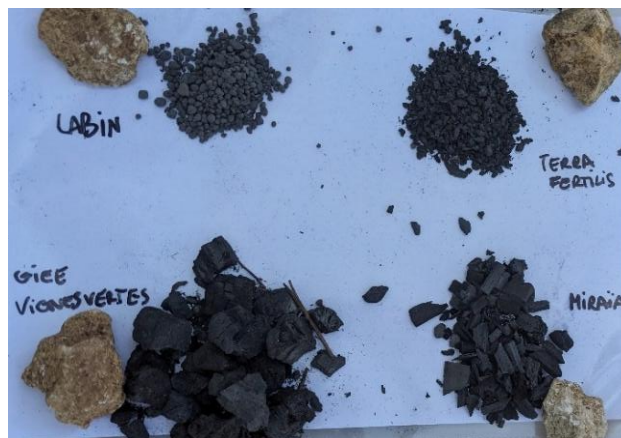


Photo 1. Photographie présentant les quatre biochars utilisés pour l'expérimentation sur champ. En haut à gauche = Biochar LABIN® ; En haut à droite = Biochar Terra Fertilis® ; En bas à gauche = Biochar produit par le GIEE Vignes Vertes et Méditerranée ; En bas à droite = Biochar MIRAÏA®.

Les informations détaillées obtenues sur les processus de fabrication, la MO utilisée et les caractéristiques des différents biochars testés lors de cette expérimentation sont disponibles en Annexe 6.

4.2.2. Plan expérimental

Pour chacun de ces biochars, deux doses ont été testées :

- Dose de 2 t/ha
- Dose de 6 t/ha

Dans une zone du champ qui semblait visuellement être homogène, neuf placettes de 9 m² ont été définies (Figure 3). Sur chacune des placettes, trois tensiomètres ont été installés à 35 cm de profondeur. Les biochars ont été épandus manuellement à la surface des placettes, puis enfouis légèrement via un passage de disques réalisé sur environ 15-20 cm de profondeur. La mise en place de cette expérimentation ayant été assez tardive (juin), une pluie de 10 mm a été simulée sur l'ensemble de la zone expérimentale afin d'humidifier les biochars épandus. Pour cette expérimentation, seules les valeurs tensiométriques ont été relevées une fois par semaine. Cette parcelle de champ sera entretenue régulièrement par le viticulteur afin de limiter la présence d'un couvert sur les placettes expérimentales.

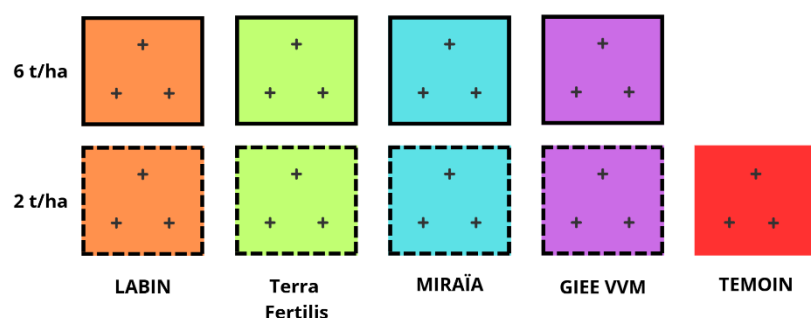


Figure 3. Cartographie des placettes expérimentales sur champ. Les placettes mesurent 9 m^2 et sont séparées les unes des autres d'une distance de 1 m. Les couleurs permettent de différencier les biochars utilisés. Orange = Biochar de la marque LABIN®. Vert = Biochar de la marque Terra Fertilis®. Bleu = Biochar de la marque MIRAÏA®. Violet = Biochar produit par le GIEE Vignes Vertes et Méditerranée. Rouge = Témoin (Aucun amendement). Les contours des placettes permettent de différencier les doses de biochar apportées. Contours en traits pleins = Dose de 6 t/ha. Contours en traits pointillés = Dose de 2 t/ha. Les croix indiquent l'emplacements des tensiomètres.

4.3. Traitement statistique des données

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel R-Studio (version R 4.5.1). Les données ont été traitées séparément pour les différentes parcelles expérimentales en raison d'une forte hétérogénéité. Les saisons étudiées (2023-2024 et 2024-2025) ont également été analysées séparément.

Pour les valeurs tensiométriques et les IC-Apex des parcelles viticoles, des modèles linéaires (ANOVA) à 2 facteurs (Modalité + Date) ont été utilisés. Un modèle avec interaction (Modalité * Date) a systématiquement été comparé avec le modèle additif. Concernant les valeurs tensiométriques, une première analyse a été réalisée sur l'ensemble de la période suivie, puis la période a été restreinte à partir de la date où des interactions significatives entre les facteurs « Modalité » et « Date » étaient observées. Les modèles ANOVA à 2 facteurs avec ou sans interaction ont de nouveau été comparés. Lorsque les modalités présentaient des différences significatives ($p < 0,05$), un test post-hoc SNK a alors été appliqué sur cette période réduite.

Pour les valeurs tensiométriques de l'expérimentation en champ, un modèle linéaire (ANOVA) à 3 facteurs (Type + Dose + Date) a été utilisé. Les modèles avec interactions (Type * Dose * Date) ont été comparés.

Pour la vitesse d'infiltration de l'eau dans les sols, le rendement par pied de vigne et le poids des sarments par pied de vigne, des modèles linéaires (ANOVA) à 1 facteur (Modalité) ont été réalisés, séparément pour chaque parcelle et chaque saison étudiée. Pour le nombre de grappes par pied de vigne, c'est un modèle linéaire généralisé de type Poisson à 1 facteur (Modalité) qui a été utilisé. Si les données le permettaient, un modèle mixte incluant l'effet aléatoire « Placettes » a également été testé. Lorsque les modalités présentaient des différences significatives ($p < 0,05$), un test SNK a alors été appliqué.

(excepté pour la variable « Nombre de grappes » où c'est le test *emmeans* qui a été utilisé).

Les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité des résidus ont systématiquement été vérifiées. Les modèles finaux qui ont été utilisés pour chaque variable, chaque parcelle et chaque saison étudiée sont recensés en Annexe 7.

5. Résultats

5.1. Résultats des expérimentations sur parcelles viticoles

5.1.1. Effet des modalités sur l'état hydrique du sol

Effet des modalités sur la tensiométrie du sol

Le potentiel hydrique du sol s'exprime normalement avec des valeurs négatives. Dans cette étude, les mesures tensiométriques sont présentées avec des valeurs positives dans l'ensemble des graphiques : 0 kPa correspond à une forte disponibilité en eau, tandis que 199 kPa indique une plus faible disponibilité en eau. Les analyses et commentaires développés dans la partie « Résultats » suivront donc cette convention.

Résultats Tensiométrie Aspiran

Pour la saison 2023-2024, les valeurs tensiométriques moyennes des différentes modalités suivent une tendance assez similaire entre le 25 avril (début de l'expérimentation) et mi-juin 2024 (Figure 4). Ensuite, les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test post-hoc SNK, réalisés entre le 20 juin et le 06 août 2024, mettent en évidence des valeurs de tensiométrie significativement plus faibles pour la modalité COMP comparée aux modalités T0 et CBr (Figure 4). Sur cette période, la modalité CBr présente la tensiométrie moyenne la plus élevée (141 kPa), suivi par T0 (136 kPa) et enfin par COMP (109 kPa). La modalité COMP affiche ainsi une tensiométrie moyenne 20 % plus faible que celle de T0 et 23 % plus faible que celle de CBr.

Pour la saison 2024-2025, les valeurs tensiométriques moyennes des différentes modalités suivent une tendance similaire entre le 11 février (début des mesures) et début juin 2025 (Figure 4). Ensuite, les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test post-hoc SNK, réalisés entre le 06 juin et le 31 août 2025, mettent à nouveau en évidence des valeurs de tensiométrie significativement plus faibles pour la modalité COMP comparée aux modalités T0 et CBr (Figure 4). Sur cette période, la modalité CBr présente la tensiométrie moyenne la plus élevée (161 kPa), suivi par T0 (156 kPa) et enfin par COMP

(138 kPa). La modalité COMP affiche donc cette fois une tensiométrie moyenne 13 % plus faible que celle de T0 et 14 % plus faible que celle de CBr.

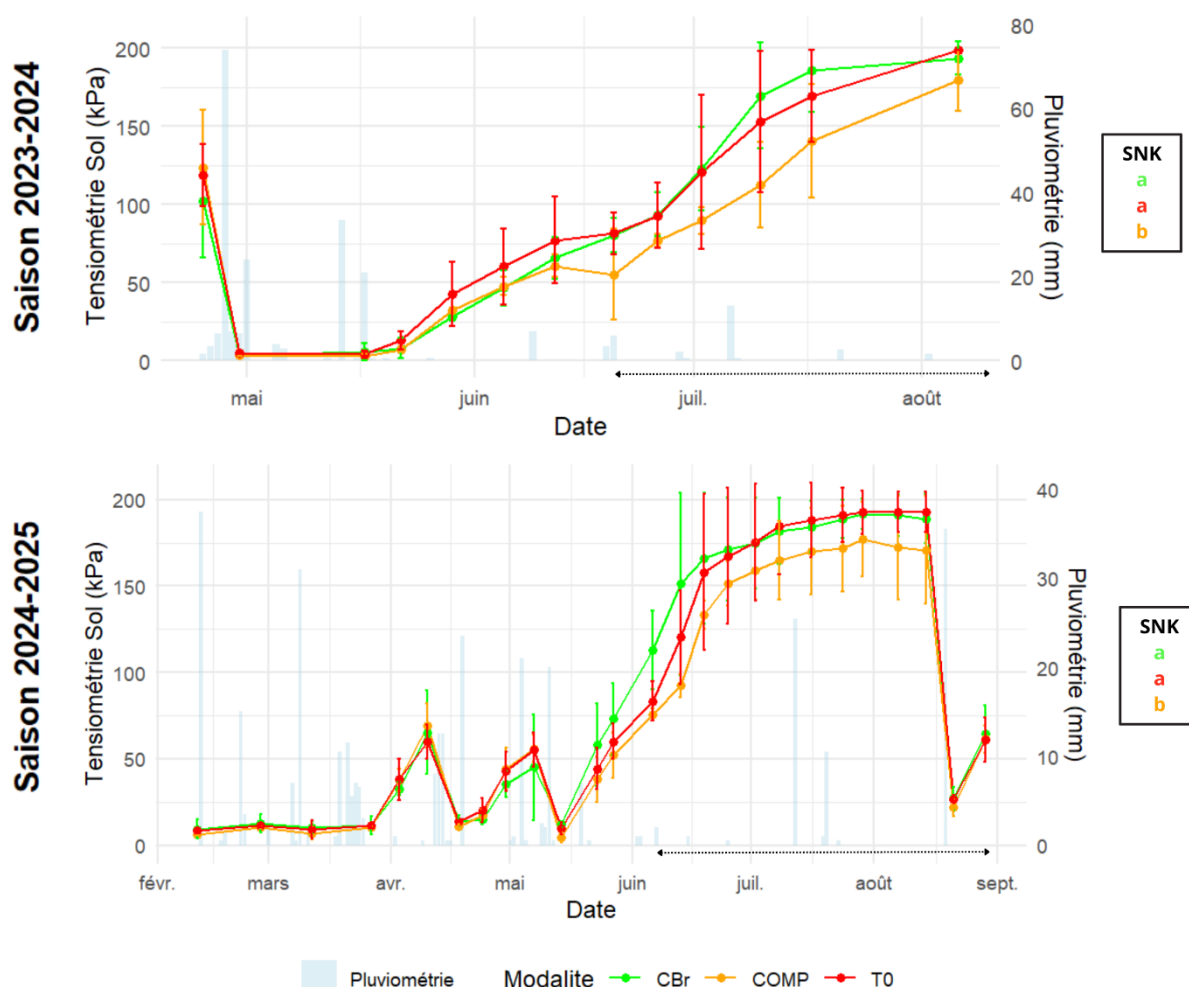


Figure 4. Évolution de la tensiométrie moyenne du sol sur le site d'Aspiran durant la saison 2023-2024 (25/04/24-06/08/24) et 2024-2025 (11/02/25-31/08/25) en fonction des différentes modalités testées et de la pluviométrie. CBr (vert) = Compost + Biochar LABIN® (2 t/ha) ; COMP (orange) = Compost Seul ; T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement). Pour chaque date et chaque modalité, les IC95 sont représentés. La double flèche en pointillée montre la période sur laquelle les tests ANOVA et SNK ont été réalisés. L'encadré SNK présente les résultats obtenus. Les lettres indiquent la significativité des différences observées. La couleur des lettres permet d'identifier les modalités. L'ordre des lettres représente le classement des différentes modalités en fonction de leur tensiométrie moyenne (de la plus élevée à la plus faible).

Résultats Tensiométrie Cournonterral

Pour la saison 2023-2024, les valeurs tensiométriques moyennes des différentes modalités suivent une tendance similaire entre le 25 avril (début de l'expérimentation) et fin juin 2024 (Figure 5). Ensuite, les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test post-hoc SNK, réalisés entre le 02 juillet et le 06 août 2024, mettent en évidence des valeurs de tensiométrie significativement plus faibles pour la modalité CBr comparée aux

modalités T0 et COMP (Figure 5). Sur cette période, la modalité T0 présente la tensiométrie moyenne la plus élevée (147 kPa), suivi par COMP (135 kPa) et enfin par CBr (96 kPa). La modalité CBr affiche ainsi une tensiométrie moyenne 35 % plus faible que celle de T0 et 29 % plus faible que celle de COMP.

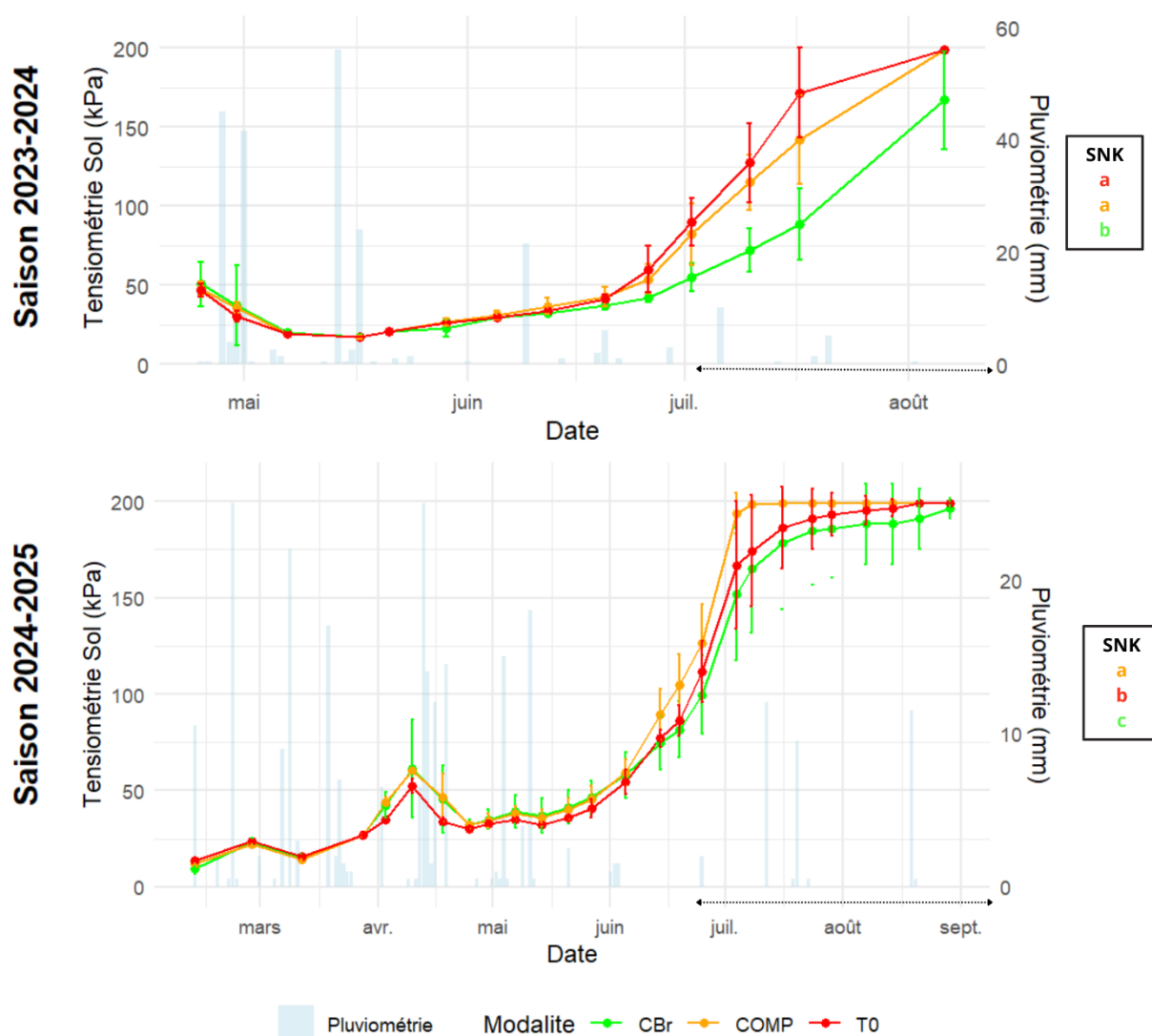


Figure 5. Évolution de la tensiométrie moyenne du sol sur le site de Cournonterral durant la saison 2023-2024 (25/04/24-06/08/24) et 2024-2025 (11/02/25-31/08/25) en fonction des différentes modalités testées et de la pluviométrie. CBr (vert) = Compost + Biochar LABIN® (2 t/ha) ; COMP (orange) = Compost Seul ; T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement). Pour chaque date et chaque modalité, les IC95 sont représentés. La double flèche en pointillée montre la période sur laquelle les tests ANOVA et SNK ont été réalisés. L'encadré SNK présente les résultats obtenus. Les lettres indiquent la significativité des différences observées. La couleur des lettres permet d'identifier les modalités. L'ordre des lettres représente le classement des différentes modalités en fonction de leur tensiométrie moyenne (de la plus élevée à la plus faible).

Pour la saison 2024-2025, les valeurs tensiométriques moyennes des différentes modalités suivent une tendance similaire entre le 11 février (début des mesures) et mi-juin 2025 (Figure 5). Ensuite, les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test SNK,

réalisés entre le 25 juin et le 31 août 2025, mettent en évidence des valeurs de tensiométrie significativement différentes entre les trois modalités (Figure 5). La modalité COMP présente la tensiométrie moyenne la plus élevée (190 kPa), suivi par T0 (179 kPa) et enfin par CBr qui affiche la tensiométrie moyenne la plus faible (170 kPa). Sur cette période, la modalité CBr affiche donc une tensiométrie moyenne 5 % plus faible que celle de T0 et 10 % plus faible que celle de COMP.

Il est important de rappeler que les tensiomètres utilisés pour les mesures sont plafonnés à 199 kPa et que la modalité COMP atteint ce seuil à partir du 08 juillet 2025. La modalité T0 l'atteint également à partir du 21 août 2025.

Résultats Tensiométrie Adissan 2024-2025

Entre le 25 avril (début de l'expérimentation) et début juin 2025, les différentes modalités suivent une tendance similaire (Figure 6). Ensuite, les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test post-hoc SNK, réalisés entre le 06 juin et le 31 août 2025 mettent en évidence des valeurs de tensiométrie significativement plus élevées pour la modalité CBr comparée aux trois autres modalités (Figure 6). Sur cette période, la modalité CBr présente la tensiométrie moyenne la plus élevée (84 kPa), suivi par CBrDD (70 kPa), puis par COMP (69 kPa) et enfin par T0 (60 kPa) qui présente la tensiométrie moyenne la plus faible. La tensiométrie moyenne de la modalité CBr est donc 40 % plus élevée que celle de T0 et environ 20 % plus élevée que celles de COMP et CBrDD. Bien qu'aucune différence significative ne soit observée entre les modalités COMP, CBrDD et T0, leurs courbes tensiométriques ne suivent pas exactement les mêmes tendances. Il est également important de noter que les valeurs mesurées présentaient une forte variabilité entre les tensiomètres, en particulier pour la modalité T0 (Figure 6).

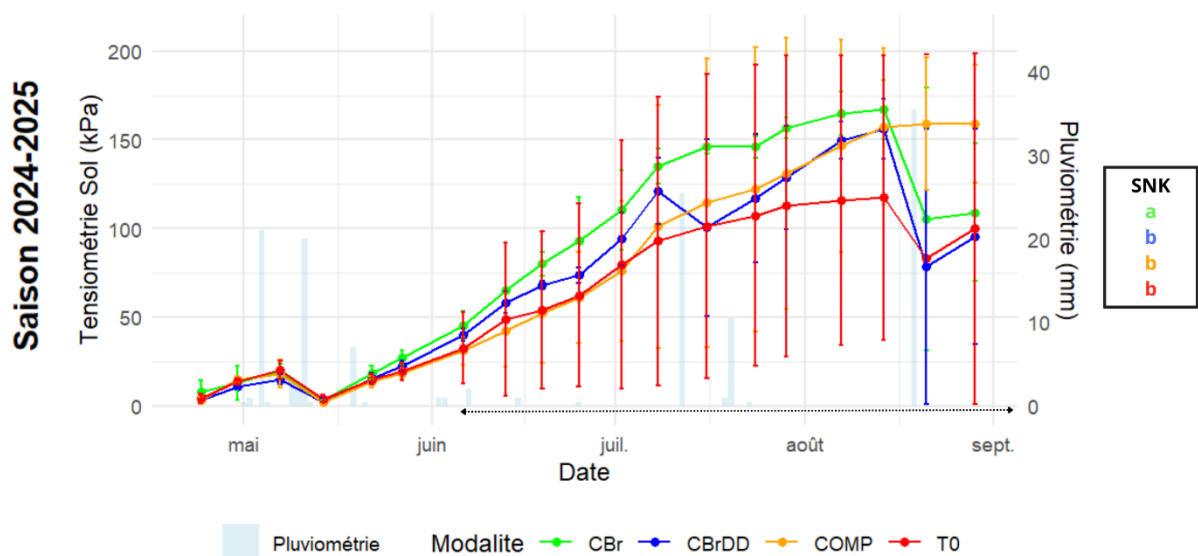


Figure 6. Évolution de la tensiométrie moyenne du sol sur le site d'Adissan durant la saison 2024-2025 (25/04/25-31/08/25) en fonction des différentes modalités testées et de la pluviométrie. CBr (vert) =

Compost + Biochar LABIN® (2 t/ha) ; CBrDD (bleu) = Compost + Biochar LABIN® (4 t/ha) ; COMP (orange) = Compost Seul ; T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement). Pour chaque date et chaque modalité, les IC95 sont représentés. La double flèche en pointillée montre la période sur laquelle les tests ANOVA et SNK ont été réalisés. L'encadré SNK présente les résultats obtenus. Les lettres indiquent la significativité des différences observées. La couleur des lettres permet d'identifier les modalités. L'ordre des lettres représente le classement des différentes modalités en fonction de leur tensiométrie moyenne (de la plus élevée à la plus faible).

Enfin, la Figure 6 met en évidence un impact plus marqué sur la tensiométrie des modalités contenant du biochar (CBr et CBrDD) suite aux deux pluies estivales enregistrées. En effet, suite à la pluie de 25,5 mm le 12 juillet la tensiométrie de CBrDD diminue assez fortement. La modalité CBr, quant à elle, ne diminue pas mais plafonne autour de 140 kPa durant deux semaines. Les modalités T0 et COMP n'y réagissent pas. De la même manière, après la pluie de 35,5 mm le 19 août 2025 les tensiométries moyennes des modalités CBr et CBrDD chutent fortement, celle de T0 diminue légèrement mais celle de COMP continue d'augmenter.

Effet des modalités sur l'infiltration de l'eau dans les sols

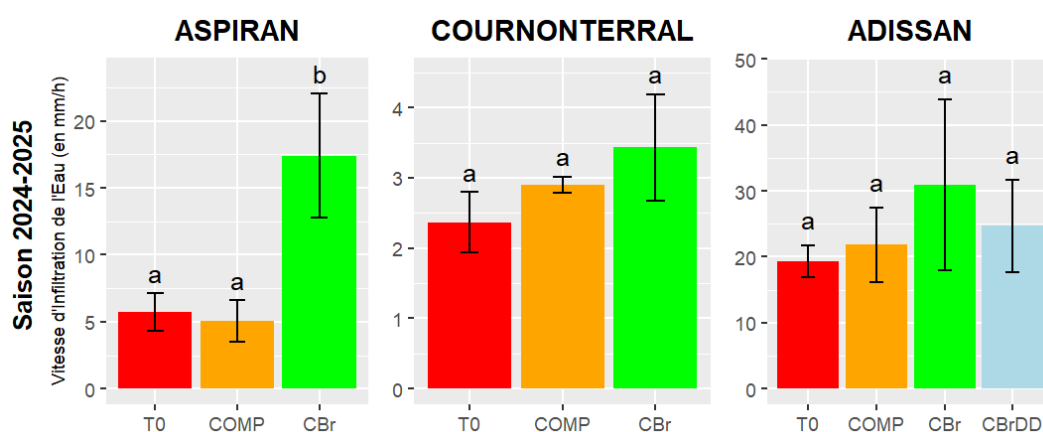


Figure 7. Diagramme en barres présentant la vitesse d'infiltration de l'eau dans les sols des trois parcelles expérimentales (Aspiran, Cournonterral et Adissan) pour la saison 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées. T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement) ; COMP (orange) = Compost Seul ; CBr (vert) = Compost + Biochar (2 t/ha) ; CBrDD (bleu) = Compost + Biochar (4 t/ha). Les IC95 sont représentés et les lettres permettent d'identifier les différences significatives.

Sur la parcelle d'Aspiran, la vitesse moyenne d'infiltration de l'eau (Figure 7) est significativement plus élevée pour la modalité CBr (17,4 mm/h) que pour les modalités T0 et COMP (respectivement 5,7 et 5 mm/h). Ainsi, l'infiltration de l'eau est environ 3,5 fois plus rapide dans la modalité CBr que dans les deux autres. Pour les parcelles de Cournonterral et d'Adissan, aucune différence significative n'a été mise en évidence, bien qu'une tendance similaire soit observée (Figure 7). En effet, la modalité CBr présente systématiquement une vitesse d'infiltration supérieure à celles de T0 et COMP. Sur la modalité CBr de la parcelle de Cournonterral, la vitesse moyenne d'infiltration de l'eau est 42 % plus élevée que celle de la modalité T0, et 60 % plus élevée sur la parcelle

d'Adissan. En revanche, sur la parcelle d'Adissan, la vitesse moyenne d'infiltration de l'eau sur la modalité CBrDD (24,7 mm/h) reste inférieure à celle de CBr (30,9 mm/h).

5.1.2. Effet des modalités sur l'état hydrique et la productivité de la vigne

Effet des modalités sur l'état hydrique de la vigne

L'IC-Apex est un indice variant entre 0 et 1, utilisé pour évaluer le stress hydrique subi par la vigne. Plus l'indice se rapproche de 0, plus cela signifie que la vigne est stressée et que la croissance de ses apex ralentit.

Résultats Apex Aspiran

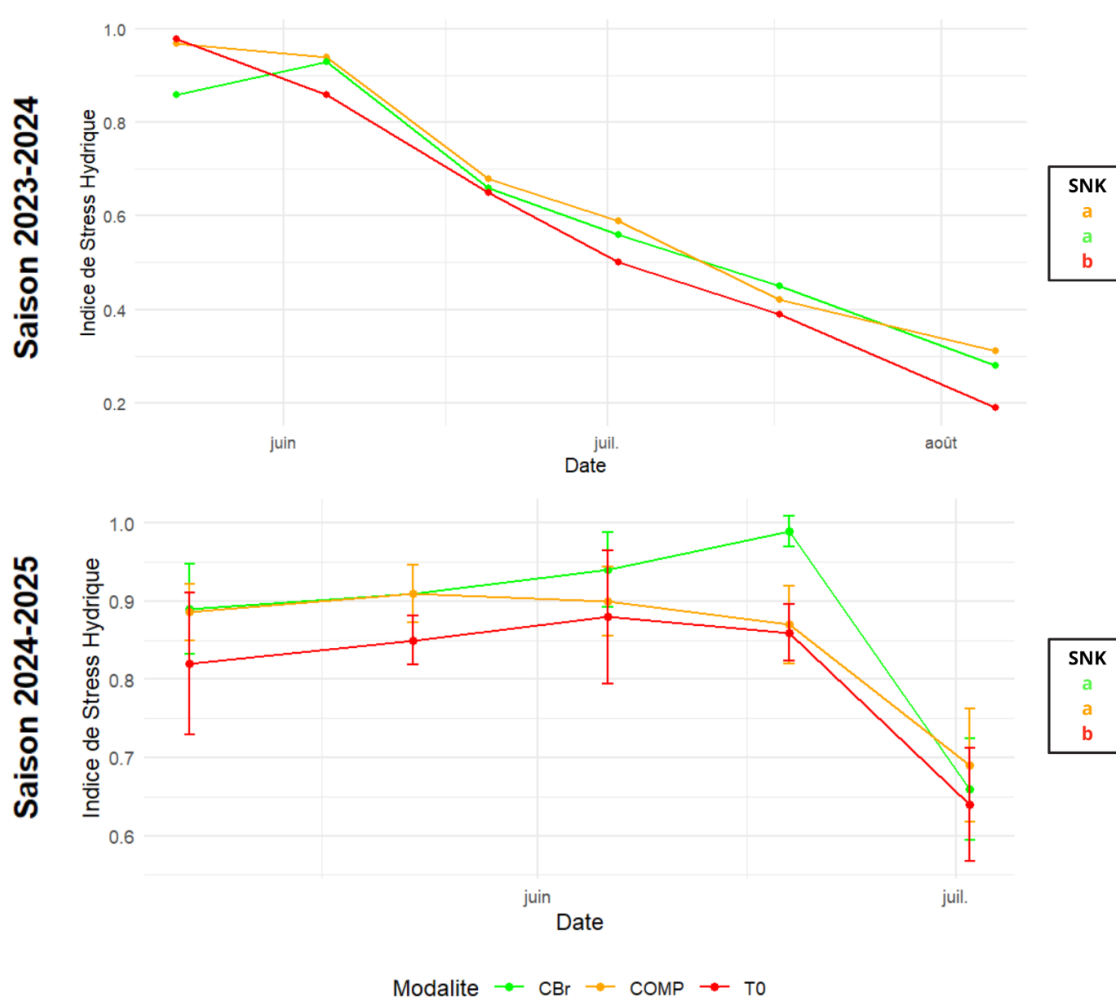


Figure 8. Évolution de l'indice de stress hydrique (IC-Apex) sur le site d'Aspiran durant la saison 2023-2024 (06/05/24-06/08/24) et 2024-2025 (07/05/25-02/07/25) en fonction des différentes modalités testées. CBr (vert) = Compost + Biochar LABIN® (2 t/ha) ; COMP (orange) = Compost Seul ; T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement). Pour la saison 2023-2024, les IC95 ne sont pas représentés puisqu'un seul IC-Apex a été calculé pour chaque date et pour chaque modalité. Pour la saison 2024-2025, les IC95 sont représentés puisque cinq IC-Apex ont été calculés pour chaque date et pour chaque modalité. L'encadré présente les résultats obtenus suite aux tests ANOVA et SNK. Les lettres indiquent la significativité des différences

observées. La couleur des lettres permet d'identifier les modalités. L'ordre des lettres représente le classement des différentes modalités en fonction de leur IC-Apex moyen (du plus élevé au plus faible).

Pour la saison 2023-2024, les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test post-hoc SNK (Figure 8) montrent que les indices de stress hydrique sont significativement plus élevés pour les modalités COMP et CBr comparées à T0 (respectivement +14 % et +11 % en moyenne). La modalité COMP présente l'IC-Apex moyen le plus élevé (0,59), suivi par CBr (0,58) et enfin par T0 (0,52).

Pour la saison 2024-2025, les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test post-hoc SNK (Figure 8) montrent que les indices de stress hydrique sont, là aussi, significativement plus élevés pour les modalités COMP et CBr comparées à T0 (respectivement +5 % et +8 % en moyenne). Cette fois, la modalité CBr présente l'IC-Apex moyen le plus élevé (0,88), suivi par COMP (0,85) et enfin par T0 (0,81).

Résultats Apex Cournonterral

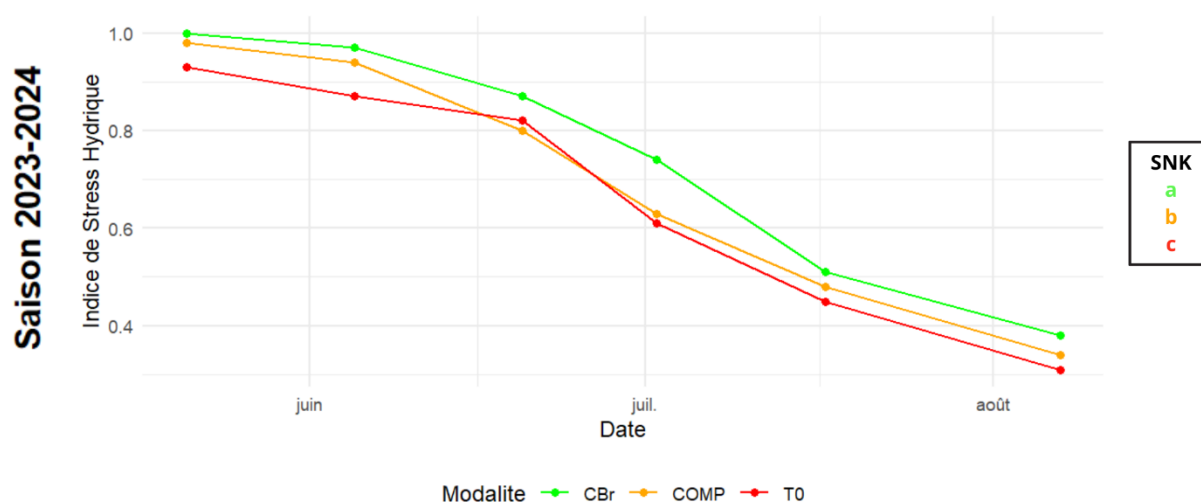


Figure 9. Évolution de l'indice de stress hydrique (IC-Apex) sur le site de Cournonterral durant la saison 2023-2024 (06/05/24-06/08/24) en fonction des différentes modalités testées. CBr (vert) = Compost + Biochar LABIN® (2 t/ha) ; COMP (orange) = Compost Seul ; T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement). Ici, les IC95 ne sont pas représentés puisqu'un seul IC-Apex a été calculé pour chaque date et pour chaque modalité. L'encadré présente les résultats obtenus suite aux tests ANOVA et SNK. Les lettres indiquent la significativité des différences observées. La couleur des lettres permet d'identifier les modalités. L'ordre des lettres représente le classement des différentes modalités en fonction de leur IC-Apex moyen (du plus élevé au plus faible).

Pour la saison 2023-2024, les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test post-hoc SNK mettent en évidence des différences significatives entre l'ensemble des modalités (Figure 9). La modalité CBr présente l'IC-Apex moyen le plus élevé (0,75), suivi par COMP (0,70) et enfin par T0 (0,66). La modalité CBr présente donc un IC-Apex moyen 13 % plus élevé que celui de T0 et 7 % plus élevé que celui de COMP.

Pour la saison 2024-2025, les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test post-hoc SNK ne mettent en évidence aucune différence significative entre les modalités (Annexe 8).

Résultats Apex Adissan 2024-2025

Les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test post-hoc SNK montrent que l'indice de stress hydrique est significativement plus élevé pour la modalité CBrDD comparée aux modalités T0 et COMP (Figure 10). La modalité CBrDD présente l'IC-Apex moyen le plus élevé (0,78), suivi par CBr (0,76), puis par COMP (0,73) et enfin par T0 (0,72). L'IC-Apex de la modalité CBrDD est donc en moyenne 8 % plus élevé que celui de T0 et 7 % plus élevé que celui de COMP. Aucune différence significative avec la modalité CBr n'est identifiée.

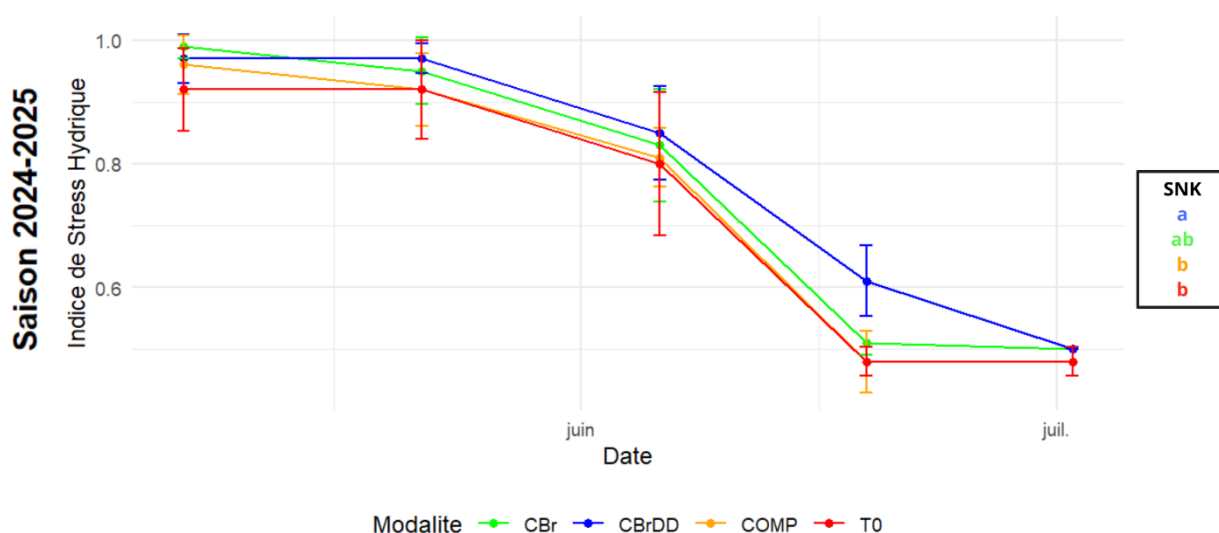


Figure 10. Évolution de l'indice moyen de stress hydrique (IC-Apex) sur le site d'Adissan durant la saison 2024-2025 (07/05/25-02/08/25) en fonction des différentes modalités testées. CBr (vert) = Compost + Biochar LABIN® (2 t/ha) ; CBrDD (bleu) = Compost + Biochar LABIN® (4 t/ha) ; COMP (orange) = Compost Seul ; T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement). Ici, les IC95 sont représentés puisque cinq IC-Apex ont été calculés pour chaque date et pour chaque modalité. L'encadré présente les résultats obtenus suite aux tests ANOVA et SNK. Les lettres indiquent la significativité des différences observées. La couleur des lettres permet d'identifier les modalités. L'ordre des lettres représente le classement des différentes modalités en fonction de leur IC-Apex moyen (du plus élevé au plus faible).

Effet des modalités sur le rendement de la vigne et ses composantes

Pour la saison 2024-2025, sur la parcelle de Cournonterral, le nombre de grappes par pied de vigne (Figure 11) est significativement plus élevé dans la modalité COMP comparée à la modalité CBr (+5,5 grappes / pied de vigne en moyenne). Cette différence n'était pas observée pour la saison 2023-2024 sur cette même parcelle. Pour la parcelle d'Aspiran, aucune différence significative entre les modalités n'a été relevée, aussi bien pour la

saison 2023-2024 que pour la saison 2024-2025. De la même manière, aucune différence significative entre les modalités n'est observée pour la parcelle d'Adissan.

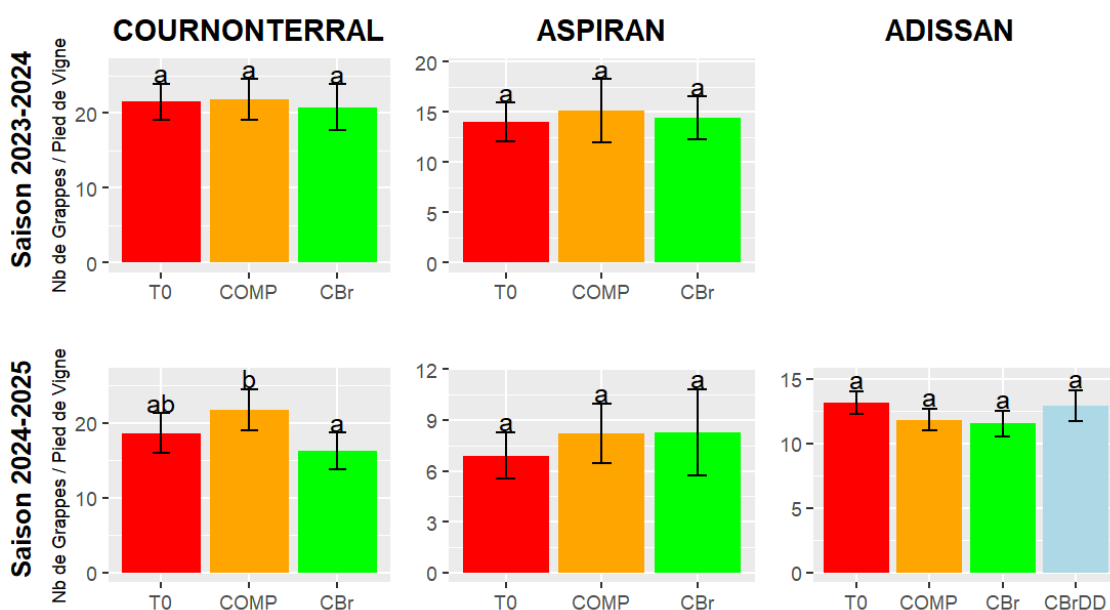


Figure 11. Diagrammes en barres présentant le nombre de grappes moyen par pied de vigne dans les trois parcelles expérimentales (Aspiran, Cournonterral et Adissan) pour les saisons 2023-2024 et 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées. T0 (rouge) = Témoin (Aucun Amendement) ; COMP (orange) = Compost Seul ; CBr (vert) = Compost + Biochar (2 t/ha) ; CBrDD (bleu) = Compost + Biochar (4 t/ha). Les IC95 sont représentés et les lettres permettent d'identifier les différences significatives.

Tableau 4. Poids de 200 baies (en g) dans les deux parcelles expérimentales (Aspiran et Cournonterral) pour les saisons 2023-2024 et 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées. T0 (rouge) = Témoin (Aucun Amendement) ; COMP (orange) = Compost Seul ; CBr (vert) = Compost + Biochar (2 t/ha). Aucun test statistique n'a été réalisé puisqu'une unique mesure a été effectuée.

	Poids de 200 Baies (en g)			
	ASPIRAN		COURNONTERRAL	
	2023-2024	2024-2025	2023-2024	2024-2025
T0	497	556	216	172
COMP	589	556	200	150
CBr	520	588	222	148

Sur la parcelle d'Aspiran, pour la saison 2023-2024, le poids des 200 baies (Tableau 4) est supérieur dans la modalité COMP comparée aux modalités T0 et CBr. Le poids des baies de la modalité COMP est alors 19 % plus élevé que celui de T0 et 13 % plus élevé que celui de CBr. Le poids des baies de la modalité CBr est également 5 % plus élevé que celui de T0. Pour la saison 2024-2025, c'est la modalité CBr qui présente le poids des baies le plus élevé : +6 % par rapport aux modalités T0 et COMP.

Sur la parcelle de Cournonterral, pour la saison 2023-2024, les trois modalités présentent des valeurs extrêmement proches (Tableau 4). Le poids de 200 baies est très légèrement supérieur dans la modalité CBr comparée aux modalités T0 et COMP (respectivement +6 et +22 g). Pour la saison 2024-2025, c'est la modalité T0 qui présente le poids des baies le plus élevé. Le poids de 200 baies des modalités COMP et CBr est alors 13 % plus faible que celui de T0.

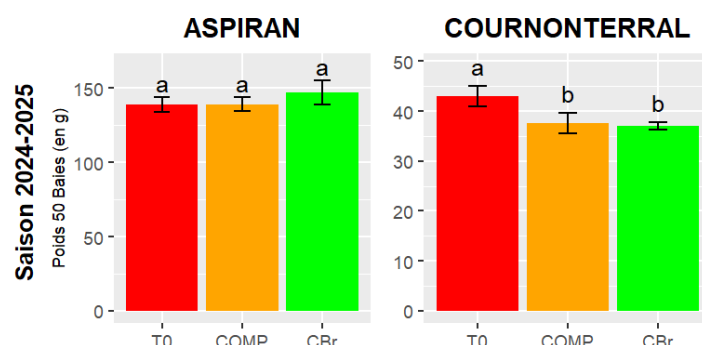


Figure 12. Diagrammes en barres présentant le poids de 50 baies dans les deux parcelles expérimentales (Aspiran et Cournonterral) pour la saison 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées. T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement) ; COMP (orange) = Compost Seul ; CBr (vert) = Compost + Biochar (2 t/ha). Les IC95 sont représentés et les lettres permettent d'identifier les différences significatives.

Le poids de 50 baies (Figure 12), a été mesuré uniquement pour la saison 2024-2025. Sur la parcelle d'Aspiran, aucune différence significative n'a été observée entre les modalités. En revanche, sur la parcelle de Cournonterral, le poids des 50 baies est significativement plus élevé sur la modalité T0 comparée aux modalités COMP et CBr, confirmant ainsi les observations faites sur le poids des 200 baies.

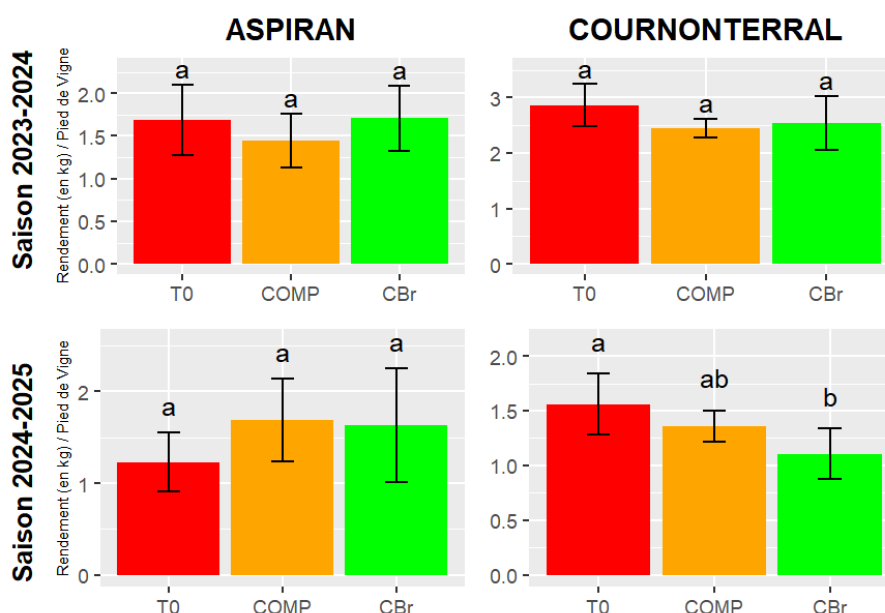


Figure 13. Diagrammes en barres présentant le rendement (en kg) par pied de vigne dans les deux parcelles expérimentales (Aspiran et Cournonterral) pour les saisons 2023-2024 et 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées. T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement) ; COMP (orange) = Compost Seul ; CBr (vert) = Compost + Biochar (2 t/ha). Les IC95 sont représentés et les lettres permettent d'identifier les différences significatives.

Sur la parcelle d'Aspiran, les rendements par pied de vigne (Figure 13) ne présentent aucune différence significative entre les modalités testées, pour les deux saisons étudiées. Cependant, durant la saison 2024-2025, la modalité T0 présente un rendement moyen (1,2 kg/pied) légèrement inférieur aux modalités COMP et CBr (environ 1,7 kg/pied). Cette différence n'a pas été observée durant la saison précédente.

Sur la parcelle de Cournonterral, pour la saison 2023-2024, aucune différence significative entre les modalités n'est observée, cependant la modalité T0 (2,9 kg/pied) présente un rendement moyen légèrement supérieur aux modalités COMP et CBr (respectivement 2,4 et 2,5 kg/pied). Pour la saison 2024-2025, la modalité T0 (1,6 kg/pied) présente cette fois un rendement significativement plus élevé que les modalités COMP et CBr (respectivement 1,4 et 1,1 kg/pied). Les rendements des modalités COMP et CBr sont donc respectivement 13 % et 29 % plus faibles que celui de T0.

Un tableau rendant compte de l'ensemble des résultats obtenus durant cette expérimentation est disponible en Annexe 9.

5.2. Résultats de l'expérimentation sur champ

5.2.1. Effet du type de biochar sur la tensiométrie du sol

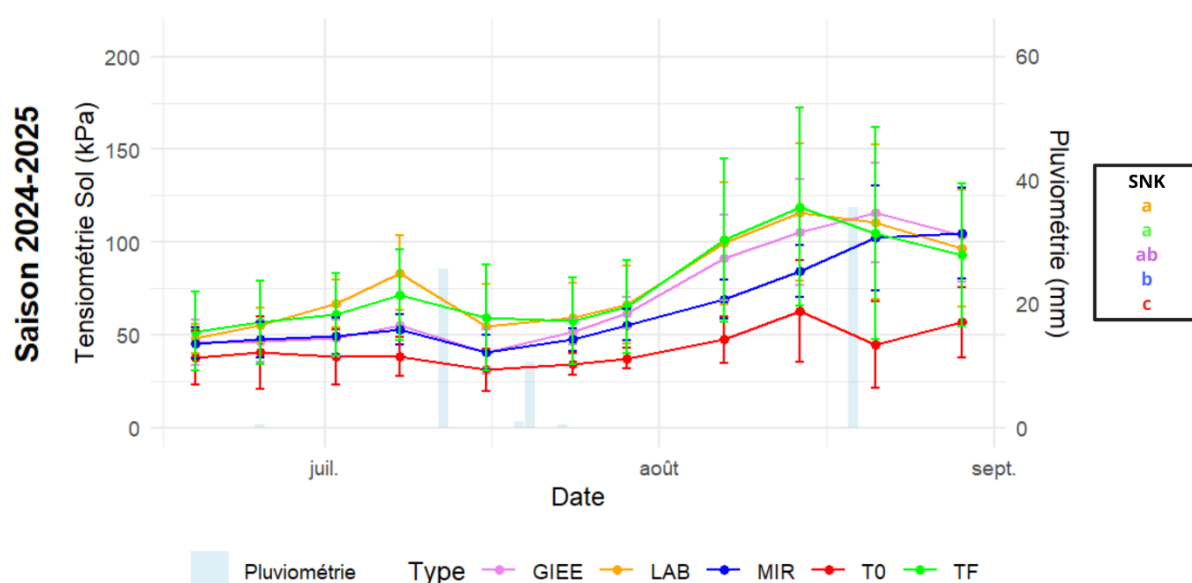


Figure 14. Évolution de la tensiométrie moyenne du sol sur le champ expérimental durant l'été 2025 en fonction des différents types de biochar utilisés et de la pluviométrie. GIEE (violet) = Biochar produit par le GIEE Vignes Vertes et Méditerranée ; LAB (orange) = Biochar LABIN® ; MIR (bleu) = Biochar MIRAÏA® ; T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement) ; TF (vert) = Biochar Terra Fertilis®. Pour chaque date et chaque modalité, les IC95 sont représentés. L'encadré présente les résultats obtenus suite aux tests ANOVA et SNK. Les lettres indiquent la significativité des différences observées. La couleur des lettres permet d'identifier les modalités. L'ordre des lettres représente le classement des différentes modalités en fonction de leur tensiométrie moyenne (de la plus élevée à la plus faible).

La Figure 14 présente l'évolution de la tensiométrie du sol sur le champ expérimental, entre le 19 juin (début de l'expérimentation) et le 31 août 2025. Les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test SNK (Figure 14), mettent en évidence des valeurs de tensiométrie significativement plus faibles pour la modalité T0 comparée à l'ensemble des modalités avec biochar (LAB, MIR, GIEE et TF). Par ailleurs, les modalités LAB et TF présentent des valeurs de tensiométrie significativement plus élevées que MIR. Ainsi, les modalités LAB et TF présentent les tensiométries moyennes les plus élevées (respectivement 72 et 71 kPa), suivi par GIEE (61 kPa), puis par MIR (55 kPa) et enfin par T0 (41 kPa). Les tensiométries moyennes des modalités MIR, GIEE, TF et LAB sont respectivement 34 %, 49 %, 75 % et 77 % plus élevées que celle de T0.

5.2.2. Effet de la dose de biochar sur la tensiométrie du sol

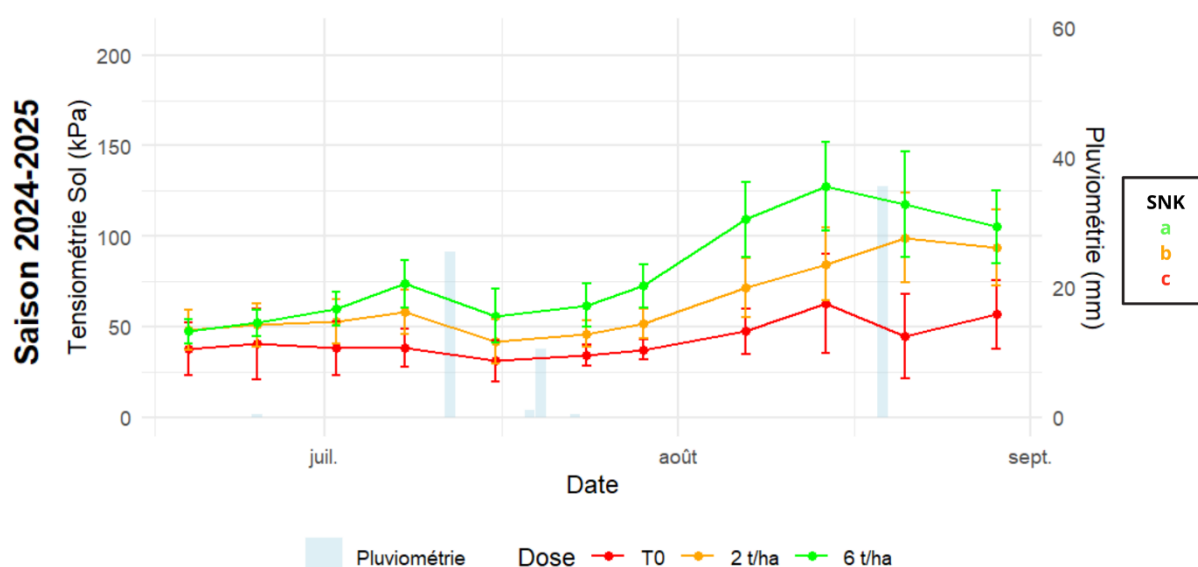


Figure 15. Évolution de la tensiométrie moyenne du sol sur le champ expérimental durant l'été 2025 en fonction des différentes doses de biochar apportées et de la pluviométrie. T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement) ; 2 t/ha (orange) = Biochar apporté à la dose de 2 t/ha ; 6 t/ha (vert) = Biochar apporté à la dose de 6 t/ha. Pour chaque date et chaque modalité, les IC95 sont représentés. L'encadré présente les résultats obtenus suite aux tests ANOVA et SNK. Les lettres indiquent la significativité des différences observées. La couleur des lettres permet d'identifier les modalités. L'ordre des lettres représente le classement des différentes modalités en fonction de leur tensiométrie moyenne (de la plus élevée à la plus faible).

La Figure 15 présente l'évolution de la tensiométrie du sol sur le champ expérimental, entre le 19 juin (début de l'expérimentation) et le 31 août 2025. Les résultats de l'ANOVA à deux facteurs et du test SNK mettent en évidence des différences significatives entre l'ensemble des modalités (Figure 15). La modalité « 6 t/ha » présente la tensiométrie moyenne la plus élevée (73 kPa), suivi par la modalité « 2 t/ha » (56 kPa) et enfin par la modalité T0 (31 kPa). Les modalités « 2 t/ha » et « 6 t/ha » présentent ainsi respectivement une tensiométrie moyenne 37 % et 80 % plus élevée que celle de T0. De plus, la modalité

« 6 t/ha » présente une tensiométrie moyenne 31 % plus élevée que celle de la modalité « 2 t/ha ».

6. Discussion

La problématique principale était la suivante : ***Un amendement en Compost-Biochar permet-il d'augmenter la disponibilité en eau des sols et de diminuer le stress hydrique de la vigne en contexte méditerranéen ?***

Des sous-problématiques s'ajoutaient : ***Dans quelle mesure un apport supplémentaire de biochar est bénéfique vis-à-vis d'un apport de compost seul ? Quel type de biochar est le plus performant pour ces effets ? Quelle dose de biochar permet d'optimiser ces effets ?***

6.1. Disponibilité en eau du sol : des résultats variables selon les saisons, les parcelles et les conditions d'expérimentation

L'effet de l'amendement Compost-Biochar sur la tensiométrie du sol varie considérablement selon les parcelles. Les résultats mettent en évidence un impact positif sur la parcelle de Cournonterral (Figure 5), neutre sur celle d'Aspiran (Figure 4) et négatif sur celles d'Adissan (parcelle viticole et champ) (Figure 6 ; Figure 14). Ces variations semblent être influencées par le type de sol, les conditions climatiques saisonnières, notamment la pluviométrie, ainsi que par les conditions de mise en place des expérimentations. Les effets constatés ont été accentués par l'augmentation de la dose et la diminution de la granulométrie du biochar (Figure 14 ; Figure 15). Par ailleurs, cette étude a systématiquement révélé des différences significatives entre l'amendement Compost-Biochar et l'amendement Compost seul, soulignant l'influence prépondérante du biochar, qu'elle soit positive ou négative, sur la modification de la disponibilité et de l'infiltration de l'eau dans les sols (Figure 4; Figure 5; Figure 6; Figure 7).

6.1.1. Des différences selon les parcelles et le type de sol

Les effets d'un apport de mélange Compost-Biochar sur la disponibilité en eau du sol semblent, en partie, dépendre des caractéristiques de la parcelle, et en particulier de la texture du sol. Un effet positif a ainsi été observé dans le sol à texture grossière de la parcelle de Cournonterral (Figure 5), tandis que des effets neutres ou négatifs ont été relevés dans les sols à textures plus fines des parcelles d'Aspiran et d'Adissan (Figure 4 ; Figure 6 ; Figure 14). Ces observations rejoignent celles rapportées dans la littérature. En effet, plusieurs méta-analyses (Razzaghi et al., 2020 ; Wei et al., 2023), ont montré que l'augmentation de la teneur en eau liée au biochar était généralement plus marquée dans les sols à texture grossière que dans les sols à texture moyenne ou fine. De leur côté, Zhang et al. (2021) ont mis en évidence une légère augmentation de l'eau disponible en

sols sableux, mais aucun effet en sols limoneux et argileux. Des effets négatifs ont même pu être observés dans certains sols argileux (Tryon, 1948).

Ainsi, sur la parcelle de Cournonterral, caractérisée par un sol limono-sablo-argileux, la modalité CBr a présenté une disponibilité en eau significativement supérieure à celle de la modalité T0 (+35 % sur la 1^{ère} saison et +5 % sur la 2^{ème} saison) et à celle de la modalité COMP (+29 % sur la 1^{ère} saison et +10 % sur la 2^{ème} saison) (Figure 5). Ces effets positifs, majoritairement observés dans les sols grossiers, s'expliqueraient par l'ajout de microporosités et par la création de pores intergranulaires qui permettraient de favoriser la rétention en eau et de réduire le drainage (Zhang et al., 2021). Cependant, Wei et al. (2023) soulignaient que la capacité du biochar à augmenter la rétention en eau du sol diminuait considérablement au fil du temps, et en particulier lorsqu'il était appliqué pendant plus d'un an dans les sols à texture grossière. Les résultats obtenus sur la parcelle de Cournonterral rejoignent également ce constat, l'effet positif sur la disponibilité en eau ayant été nettement plus marqué durant la première saison que durant la seconde (Figure 5).

Bien que la modalité CBr ait présenté un effet positif sur le sol à texture grossière de la parcelle de Cournonterral, l'effet contraire a été observé sur la parcelle d'Adissan, caractérisée cette fois par un sol argilo-limono-sableux. La modalité CBr a ainsi présenté une disponibilité en eau significativement plus faible que celle de la modalité T0 (-39 %) et que celle de la modalité COMP (-20 %) (Figure 6). De la même manière, les résultats obtenus sur la parcelle expérimentale de champ, caractérisée par un sol limono-argileux, confirment ceux observés sur la parcelle d'Adissan. En effet, sur cette parcelle de champ, toutes les modalités contenant du biochar ont présenté une disponibilité en eau systématiquement inférieure à celle de la modalité T0, qui n'en contenait pas (entre -44 % et -84 %), et ce de manière significative (Figure 14).

À l'inverse des sols sableux, les sols argileux présentent naturellement une capacité de rétention en eau élevée. L'effet du biochar y serait donc moins marqué et l'ajout de micropores supplémentaires pourrait également réduire la fraction en eau facilement disponible pour les racines, entraînant ainsi parfois un effet négatif (Zong et al., 2018).

Enfin, sur la parcelle d'Aspiran, caractérisée par un sol limono-argilo-sableux, aucune différence significative n'a été observée entre les modalités CBr et T0 (Figure 4). Cependant la modalité COMP a présenté une disponibilité en eau significativement supérieure à celles des modalités T0 et CBr (entre +13 % et +23 %) (Figure 4). Ainsi, sur cette parcelle, la modalité CBr a eu un effet neutre vis-à-vis de la modalité T0 mais semble être moins favorable que la modalité COMP.

La dose supplémentaire de compost qu'a reçu la modalité COMP (+ 8t/ha) pourrait expliquer la différence observée avec la modalité CBr (Tableau 2). En effet, le compost peut favoriser la formation d'agrégats (Abiven et al., 2009), augmenter la quantité d'eau disponible (Weber et al., 2007) et améliorer la teneur en eau dans les sols (Liu et al.,

2012). Néanmoins, l'ampleur de ces effets dépend fortement de la dose et de la régularité des apports (Aggelides et al., 2000 ; Brown et al., 2011 ; Weber et al., 2007). L'apport de seulement 12 t/ha de compost en 2024 sur la modalité CBr n'aurait ainsi pas été suffisant pour améliorer la disponibilité en eau du sol, mais l'apport répété dont a bénéficié la modalité COMP en 2025 aurait, quant à lui, permis une amélioration sur cette modalité (Figure 4).

Cependant, ces conclusions sont à nuancer puisque l'emplacement des modalités pourrait également avoir joué un rôle dans les résultats obtenus sur la parcelle d'Aspiran. La modalité T0 se situe en bordure de parcelle, suivie par CBr, puis par COMP qui est donc la plus au centre (Annexe 2.2). Ainsi, il est possible que les effets observés soient dus à une hétérogénéité spatiale initialement présente entre la bordure et le centre de la parcelle. Cette vigne, située au sommet d'une colline, est soumise au vent et comporte de nombreux manquants en raison de son âge (52 ans). Cette exposition est susceptible d'avoir accentué l'évaporation du sol et la transpiration de la vigne (Campi et al., 2012) sur les modalités situées en bordure (T0 puis CBr), influençant ainsi négativement leurs tensiométries (Figure 4). L'analyse du poids des sarments de la vigne réalisée en 2023, avant la mise en place de l'expérimentation, vient appuyer cette hypothèse pour la modalité T0 située la plus en bordure. En effet, celle-ci présentait déjà une vigueur significativement inférieure à celles des modalités COMP et CBr (Annexe 4).

De plus, un autre biais expérimental pourrait également expliquer la différence observée entre les modalités COMP et CBr, qui sont pourtant accolées (Annexe 2.2). En effet, durant la saison 2024-2025, les IR sur lesquels étaient placés les tensiomètres de la modalité COMP et de la modalité CBr comportaient des couverts différents : la modalité COMP présentait ainsi un couvert semé, alors que la modalité CBr présentait un couvert spontané (Tableau 2). Le couvert semé, ne s'étant pas correctement développé, le sol de cet IR était quasiment nu. La différence significative de biomasse végétale entre les deux IR (+50 % de MS sur l'IR spontané – voir Annexe 1) suggère donc que la transpiration du couvert aurait pu être plus importante sur la modalité CBr (Capri et al., 2023). La combinaison de ces facteurs (apport de compost plus faible, effet bordure et transpiration accrue du couvert) pourrait alors expliquer la disponibilité en eau réduite observée sur la modalité CBr comparée à la modalité COMP (Figure 4).

Enfin, en raison d'un sol trop tassé et déjà trop sec lors du passage de disque visant à enfouir le biochar sur cette parcelle, l'outil n'a pas pu pénétrer correctement dans le sol. Le biochar étant resté en surface, son efficacité aurait également pu être réduite. En effet, sa position en surface et son faible contact avec le sol auraient pu mener à un captage des eaux de pluie, suivi d'un assèchement rapide lié à une évaporation accentuée. Basso et al. (2013) avaient d'ailleurs montré qu'un biochar appliqué en surface entraînait une perte en eau par évaporation plus importante qu'un biochar enfoui plus profondément.

6.1.2. Influence de la pluviométrie et des conditions de mise en place

Tout d'abord, il est important de souligner que les effets de l'amendement sur la disponibilité en eau du sol ont commencé à apparaître entre les mois de juin et de juillet, période correspondant à une diminution des précipitations et à une augmentation des températures. En effet, avant cette période, aucune différence significative n'avait été observée entre les modalités, les tensiométries du sol suivaient alors des tendances similaires (Figure 4 ; Figure 5 ; Figure 6).

Comme expliqué précédemment, l'augmentation de la disponibilité en eau liée à l'apport du mélange Compost-Biochar sur la parcelle de Cournonterral a été significative pour les deux saisons étudiées (Figure 5). Néanmoins, cet effet s'est montré plus avantageux durant la saison présentant la plus forte pluviométrie (2023-2024 avec 680 mm) que durant la saison présentant de plus faibles précipitations (saison 2024-2025 avec 600 mm) (Figure 1). Ces résultats vont à l'encontre de ceux observés par Genesio et al. (2015) qui avaient mis en évidence un effet positif du biochar davantage prononcé durant les années les plus sèches.

La présence d'un couvert temporaire, ayant pu capter une grande partie de l'eau retenue par le biochar durant l'hiver et le printemps, couplée à une faible pluviométrie suite à sa destruction pourraient éventuellement expliquer ces résultats. Le couvert a en effet été détruit autour de mi-avril. Entre les mois de mai et de septembre il a plu un total de 185 mm sur l'année 2024, contre un total de seulement 71 mm sur l'année 2025 (Figure 1). Ces observations suggèrent alors qu'une pluviométrie minimale suite à la destruction du couvert pourrait être nécessaire afin que le biochar soit suffisamment chargé en eau et que les bénéfices se montrent réellement pertinents vis-à-vis d'un sol non amendé ou amendé uniquement en compost (Figure 5).

De plus, les résultats obtenus sur la parcelle d'Adissan et sur la parcelle de champ indiquent que l'épandage de biochar durant la saison 2024-2025 a induit une diminution de la disponibilité en eau du sol (Figure 6 ; Figure 14). Comme expliqué plus haut, ces résultats négatifs pourraient être expliqués par la texture du sol de ces parcelles. Cependant, l'analyse de la pluviométrie ayant suivi la mise en place des expérimentations semble indiquer qu'ils pourraient également être liés à un biochar insuffisamment humidifié après son épandage. En effet, lors de la mise en place des expérimentations sur les parcelles de Cournonterral et d'Aspiran en 2024, il a plu un total d'environ 190 mm dans le mois ayant suivi l'épandage du biochar (Figure 1). Ces deux parcelles n'ont pas montré d'effet asséchant. En revanche, en 2025, les expérimentations sur la parcelle viticole d'Adissan et particulièrement sur la parcelle de champ ont été mises en place tardivement (respectivement le 23/04/25 et le 19/06/25). Dans le mois ayant suivi l'épandage du biochar, la parcelle d'Adissan n'a ainsi reçu que 50 mm de pluie et la parcelle de champ seulement 26 mm (Figure 1).

Deux hypothèses peuvent alors être avancées pour expliquer l'effet asséchant observé suite à un épandage tardif de biochar, durant une période à faible pluviométrie. Premièrement, le biochar fraîchement produit peut présenter des propriétés hydrophobes (Mao et al., 2019). Glaser et al. (2002) avaient d'ailleurs observé une diminution significative de l'humidité des sols après des amendements avec certains biochars présentant une hydrophobicité élevée. Plusieurs études ont montré que l'ajout de biochar pouvait ainsi augmenter l'hydrophobicité du sol et perturber l'infiltration de l'eau (Mao et al., 2019 ; Basso et al., 2013 ; Gray et al., 2014). Cependant, cette caractéristique n'est pas définitive. En effet, après un contact prolongé avec le sol, l'air et l'eau, les caractéristiques du biochar évoluent et son hydrophobicité initiale diminue fortement (Basso et al., 2013 ; Cheng et al., 2006 ; Joseph et al., 2010 ; Cheng et al., 2008). Dans le cadre de notre étude, un biochar insuffisamment humidifié par les pluies aurait donc pu maintenir une hydrophobicité élevée dans la couche superficielle du sol, limitant l'infiltration et entraînant une disponibilité en eau réduite dans ces modalités (Figure 6 ; Figure 14).

Deuxièmement, le mouvement de l'eau dans le sol dépend de son état de saturation : lorsque le sol est saturé, l'eau se déplace principalement sous l'influence de la gravité, tandis qu'en conditions non saturées, c'est la différence de potentiel hydrique qui constitue la force motrice principale. L'eau se déplace alors toujours du potentiel hydrique le plus élevé vers le potentiel hydrique le plus faible (Bhatt et al., 2014). Dans notre expérimentation, le biochar étant resté relativement sec puisque peu soumis aux pluies, son potentiel hydrique aurait pu être bien plus faible que celui du sol environnant. Une partie de l'eau du sol aurait alors pu se déplacer vers le biochar (0-20 cm de profondeur), réduisant par conséquent la disponibilité de celle-ci dans la zone où étaient situés les tensiomètres (40 cm de profondeur). Par ailleurs, Brewer et al. (2014) abordaient également les limites que représentait la microporosité du biochar, importante pour les interactions chimiques, mais qui s'avéraient être moins pertinentes pour les questions liées à la disponibilité de l'eau. Ils mettaient ici en avant des forces capillaires élevées, retenant l'eau trop fortement pour que les plantes puissent la prélever (Brewer et al., 2014). L'ajout d'un biochar sec aurait ainsi pu provoquer un déplacement de l'eau du sol vers les microporosités du biochar, où elle aurait été fortement retenue par les forces capillaires. L'eau serait ainsi toujours présente dans le sol mais plus difficilement disponible pour les plantes.

La poursuite de l'expérimentation durant la saison prochaine, et plus particulièrement le suivi de la disponibilité en eau suite aux pluies hivernales, sera donc cruciale afin d'appréhender de manière plus juste les raisons ayant conduit à un effet asséchant durant cette saison (Figure 6 ; Figure 14).

6.1.3. Effet des caractéristiques et de la dose de biochar

Comme expliqué précédemment, dans l'expérimentation sur champ, l'ensemble des modalités contenant du biochar ont montré une disponibilité en eau significativement inférieure à celle de la modalité T0 sans biochar (Figure 14). Toutefois, deux types de biochars (LAB et TF) se sont également différenciés des autres. En effet, les biochars LABIN® et TerraFertilis®, caractérisés par une granulométrie très faible (0-2 mm), ont entraîné une disponibilité en eau plus réduite que les biochars MIRAÏA® et GIEE, dont la granulométrie était supérieure (0-50 mm) (Annexe 5). Par ailleurs, la dose de biochar utilisée s'est révélée déterminante : la dose à 6 t/ha a ainsi induit une disponibilité en eau du sol significativement inférieure à celle observée avec la dose à 2 t/ha (-31 %) (Figure 15). Dans le contexte d'une expérimentation mise en place tardivement et utilisant un biochar insuffisamment humidifié, l'association d'une dose élevée et de biochars à faibles granulométries pourrait alors accentuer la diminution de la disponibilité en eau du sol (Figure 14 ; Figure 15).

Ces résultats vont à l'encontre de la majorité des études portant sur le biochar. Généralement, une dose plus importante et une granulométrie plus faible permettaient d'augmenter le stock d'eau disponible dans les sols (Edeh et al., 2020). Néanmoins, Ndede et al. (2022) ont mis en évidence un effet similaire à celui observé ici. En effet, leurs traitements présentant les doses les plus élevées de biochar ont permis d'accroître la capacité de rétention en eau mais ont provoqué une diminution de l'eau facilement disponible, comprise entre -3 % et -50 %. Ils soulignaient également que le processus de broyage visant à atteindre la granulométrie souhaitée (entre 0,5 et 1 mm) endommageait les pores et réduisait considérablement la proportion de mésopores et macropores intraparticulaires, essentiels à la rétention de l'eau facilement utilisable par les plantes (Ndede et al., 2022). De leur côté, Wang et al. (2019) ont également constaté une plus grande efficacité avec les biochars à granulométrie élevée.

6.1.4. Effet sur l'infiltration de l'eau

L'amendement en Compost-Biochar a montré un effet positif sur l'infiltration de l'eau dans les sols (Figure 7). En effet, sur la parcelle d'Aspiran, il a permis de tripler la vitesse d'infiltration de l'eau, passant d'environ 5 mm/h pour les modalités T0 et COMP à 17 mm/h pour la modalité CBr. Sur les parcelles de Cournonterral et d'Adissan, bien que la différence n'ait pas été significative, la vitesse d'infiltration de l'eau sur la modalité CBr était également supérieure à celles observées sur les modalités T0 et COMP (entre +18 % et +60 %).

Par ailleurs, l'analyse visuelle des courbes tensiométriques de la parcelle d'Adissan apporte aussi quelques informations supplémentaires sur le comportement des différentes modalités suite aux pluies qui ont été enregistrées durant l'été (Figure 6).

Les modalités contenant du biochar (CBr et CBrDD) ont semblé permettre une meilleure infiltration des eaux de pluie. En effet, suite aux événements pluvieux enregistrés, la disponibilité en eau dans ces modalités augmentait assez fortement alors que celle des modalités COMP et T0 semblait n'y réagir que très peu, voire pas du tout. De plus, la disponibilité en eau dans les modalités avec biochar augmentait proportionnellement à la quantité d'eau perçue et à la dose de biochar appliquée : l'effet était davantage marqué sur la modalité présentant une double dose de biochar (CBrDD) et suite à la pluie estivale la plus forte.

Acharya et al. (2024) ont montré que le biochar favorisait l'infiltration de l'eau principalement dans les sols limoneux à argileux, alors que son effet restait neutre, voire négatif, dans les sols sableux ou limono-sableux. De même, Wang et al. (2017) ont observé une amélioration de l'infiltration uniquement en sol argilo-limoneux. Nos observations rejoignent alors ces résultats : une amélioration significative n'a été mise en évidence que sur le sol limono-argileux de la parcelle d'Aspiran (Figure 7). Bien que la différence ne soit pas significative, c'est également sur le sol argilo-limoneux de la parcelle d'Adissan que la vitesse d'infiltration de l'eau a été améliorée de +60 % par rapport au témoin. L'effet généralement plus prononcé dans les sols à texture fine, s'expliquerait principalement par une réduction de la formation de croûtes de surface, mais également par une amélioration de l'agrégation du sol et une augmentation de la macroporosité (Abrol et al., 2016 ; Bohara et al., 2019). Par ailleurs, le sol relativement tassé et la présence de biochar situé plus en surface, pourraient également contribuer à expliquer pourquoi l'effet positif sur l'infiltration de l'eau a été plus prononcé à Aspiran que sur les autres parcelles (Figure 7).

6.2. Stress hydrique et rendement de la vigne

6.2.1. Influence sur le stress hydrique

Le suivi de la dynamique d'arrêt de croissance des apex a permis de mettre en évidence une très légère diminution du stress hydrique chez la vigne suite à l'amendement Compost-Biochar, et dans une moindre mesure avec l'amendement en compost seul (Figure 8 ; Figure 9 ; Figure 10).

En effet, sur la parcelle d'Aspiran et durant les deux saisons étudiées, les modalités CBr et COMP ont présenté un stress hydrique significativement inférieur à celui de T0 (entre -5 % et -14 %) (Figure 8). De la même manière, sur la parcelle de Cournonterral, une réduction du stress hydrique a été identifiée durant la saison 2023-2024 sur les modalités COMP et CBr (respectivement -5 % et -12 %), avec un avantage significatif plus marqué pour cette dernière (Figure 9). Enfin, sur la parcelle d'Adissan, la modalité CBrDD a également présenté un stress hydrique significativement inférieur à celui des modalités COMP et T0 (-8 %) (Figure 10). Sur cette parcelle, aucune autre

différence significative n'a été observée entre les modalités, bien que CBr ait également entraîné une réduction du stress hydrique de 5 % comparée à COMP et T0 (Figure 10).

Les résultats obtenus sur les parcelles d'Aspiran et de Cournonterral sont globalement cohérents avec les observations tensiométriques (Figure 4 ; Figure 5 ; Figure 8 ; Figure 9). En revanche, ceux de la parcelle d'Adissan sont plutôt surprenants : bien que la disponibilité en eau ait été réduite sur les modalités contenant du biochar, ce sont elles qui ont présenté les stress hydriques les plus faibles (Figure 6 ; Figure 10). Ces résultats pourraient appuyer l'hypothèse présentée précédemment : il est possible que l'eau de pluie ait été en réalité davantage stockée dans ces modalités, augmentant ainsi la teneur en eau du sol et le stock d'eau disponible pour la vigne mais nécessitant une force plus importante pour être prélevée, en raison des forces capillaires (Ndede et al., 2022). En effet, comme expliqué dans la partie « Matériels et Méthodes », les tensiomètres utilisés ne permettent pas de mesurer des potentiels hydriques inférieurs à -199 kPa. Or, les plantes peuvent prélever de l'eau jusqu'à des potentiels atteignant -1,5 MPa (Van Leeuwen et al., 2009). Sur la parcelle d'Adissan, les valeurs tensiométriques variaient entre 0 et -150 kPa, seuil à partir duquel apparaît une légère contrainte hydrique (Gelé L., 2023). L'eau était donc largement disponible pour la vigne, mais retenue dans le sol avec une force variable selon les modalités (Figure 6). De plus, sur la parcelle d'Adissan, qui est un plantier, les racines de la vigne pourraient être encore peu profondes (Riffle et al., 2022) et profiter davantage de l'humidité fournie par le biochar situé dans les 20 premiers cm de sol, humidité qui pourrait ne pas être détectée par les tensiomètres installés plus profondément, à 40 cm.

Néanmoins, les résultats obtenus par la mesure du stress hydrique via la méthode des apex doivent être nuancés (Figure 8 ; Figure 9 ; Figure 10). Premièrement, un IC-Apex supérieur à 0,75 n'indique pas la présence d'un stress hydrique. En effet, le stress hydrique est considéré comme modéré en dessous de 0,75, et fort uniquement en dessous de 0,5 (Pichon et al., 2021). Bien que les différences d'IC-Apex entre les modalités soient significatives, elles restent très faibles. Sur l'ensemble des parcelles et des saisons étudiées, les seuils ont été atteints à des dates très proches (seulement quelques jours d'écart), suggérant que ces différences sont négligeables et qu'aucun effet marqué sur la réduction du stress hydrique de la vigne n'a réellement été observé (Figure 8 ; Figure 9 ; Figure 10). Deuxièmement, la fiabilité des résultats de la saison 2023-2024 peut être questionnée. En effet, un unique IC-Apex par date et par modalité a été mesuré au cours de cette saison, ce qui a limité les tests statistiques à seulement six répétitions par modalité (correspondant aux six dates de suivi). Lors de la seconde saison d'étude, cinq IC-Apex par date et par modalité ont été relevés, et les tests statistiques ont montré que les différences significatives étaient moins fréquentes que durant la première saison.

6.2.2. Impact sur le rendement et ses composantes

Sur la parcelle d'Aspiran et pour les deux saisons étudiées, aucune différence significative du nombre de grappes par cep n'a été observée entre les modalités (Figure 11). En revanche, sur la saison 2023-2024, la modalité COMP a affiché un poids de 200 baies supérieur à celui des modalités T0 et CBr, respectivement +19 % et +13 % (Tableau 4). Ce résultat est cohérent avec le suivi tensiométrique de la même saison, qui met en évidence une meilleure disponibilité en eau sur la modalité COMP entre mi-juin et fin août (Figure 4), période cruciale entre la nouaison et la vendange pour la formation et le remplissage des baies (Guilpart, 2014). Toujours sur la saison 2023-2024, la modalité CBr a également présenté un poids de 200 baies supérieur de 5 % à celui de T0, bien qu'aucune différence significative de disponibilité en eau n'ait été relevée entre ces deux modalités (Tableau 4 ; Figure 4). Ces résultats pourraient appuyer l'hypothèse d'une hétérogénéité spatiale initiale sur la parcelle, plus humide au centre (COMP puis CBr) qu'en bordure (T0). Néanmoins, les écarts observés restent faibles et compte tenu du manque de répétitions pour la variable « poids de 200 baies », aucune réelle conclusion ne peut être établie. Sur la saison 2024-2025, la modalité CBr a d'ailleurs présenté un poids de 200 baies supérieur de 6 % à celui des modalités COMP et T0 (Tableau 4). Toutefois, l'analyse complémentaire réalisée durant cette saison sur le poids de 50 baies, n'a révélé aucune différence significative entre les modalités (Figure 12). L'analyse du rendement final par cep confirme également l'hypothèse d'un effet globalement neutre sur les composantes, aucune différence significative n'ayant été mise en évidence entre les trois modalités, aussi bien pour la saison 2023-2024 que pour la saison 2024-2025 (Figure 13).

Sur la parcelle de Cournonterral et pour la saison 2023-2024, aucune différence significative du nombre de grappes par cep n'a été observée entre les modalités (Figure 11). La modalité CBr a toutefois présenté un poids de 200 baies supérieur à celui des modalités COMP et T0, respectivement +11 % et +3 %, en cohérence avec le suivi tensiométrique réalisé sur la même saison (Tableau 4). Néanmoins, pour les mêmes raisons que précédemment, ces résultats ne permettent pas d'établir une réelle conclusion. De plus, l'analyse du rendement final par cep confirme, là encore, l'hypothèse d'un effet globalement neutre puisqu'aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les modalités (Figure 13).

Toujours pour la parcelle de Cournonterral, les résultats obtenus sur la saison 2024-2025 sont plus difficiles à interpréter. En effet, le nombre de grappes par cep sur la modalité COMP est significativement supérieur à celui de la modalité CBr (Figure 11). Or, cette variable dépend principalement de l'état hydrique de la vigne entre le débourrement (fin mars) et la véraison (mi-juillet) de l'année précédente (Guilpart, 2014). Le suivi tensiométrique et le suivi des apex réalisés durant cette période au cours de la saison 2023-2024 indiquaient pourtant un état hydrique plus favorable pour CBr que pour COMP (Figure 5). Cette différence pourrait donc être liée à d'autres facteurs limitants, tels que

le stress azoté, la disponibilité en carbone, la température ou bien la lumière (Guilpart, 2014).

Concernant le poids des baies, la modalité T0 a présenté un poids de 200 baies supérieur de +15 % à celui des modalités COMP et CBr, différence significative confirmée par l'analyse complémentaire sur le poids de 50 baies (Tableau 4 ; Figure 12). De plus, le rendement final par cep de la modalité CBr était significativement inférieur de 32 % à celui de T0 (Figure 13). Bien que la différence ne soit pas significative, la modalité CBr a également montré un rendement inférieur de 21 % à celui de COMP, probablement en lien avec son plus faible nombre de grappes (Figure 13 ; Figure 11). Pour ce qui est du rendement plus élevé de T0 par rapport à CBr, cela s'explique probablement par le poids plus important des baies sur la modalité T0 (Figure 13 ; Figure 12). Cependant, le suivi tensiométrique réalisé entre la nouaison et la vendange indiquait une disponibilité en eau significativement plus élevée pour la modalité CBr que pour T0 (Figure 5). L'emplacement de la modalité T0 pourrait, à nouveau, être questionnée pour l'explication de ces résultats contradictoires. En effet, il est important de rappeler que cette modalité semblait visuellement plus humide en raison de sa proximité avec un mur de voisinage favorisant la rétention des eaux de ruissellement. Ce biais ayant été identifié dès la mise en place de l'expérimentation, les tensiomètres de cette modalité ont été positionnés sur l'IR le plus éloigné du mur (Annexe 2.1). En revanche, les placettes contenant les ceps échantillonnés se trouvaient légèrement plus proches (Annexe 2.1) et il est possible que les racines de la vigne aient pu explorer cette zone plus humide. Les ceps de la modalité T0 auraient ainsi pu bénéficier d'une meilleure disponibilité en eau que ceux de la modalité CBr, se traduisant par des baies plus grosses et un rendement plus élevé, sans que cela ne soit capté par les tensiomètres (Figure 12 ; Figure 13 ; Figure 5).

Les résultats de cette expérimentation suggèrent que les amendements en Compost et Compost-Biochar ont eu des effets neutres ou limités sur le rendement final de la vigne et sur ses composantes (Figure 11 ; Tableau 4 ; Figure 12 ; Figure 13). Ils diffèrent de ceux observés par Genesio et al. (2015), qui, sur les quatre années suivant les apports de biochar, avaient observé une augmentation significative du rendement comprise entre +16 % et +66 %. Cependant, les doses appliquées dans leurs traitements (22 t/ha et 44 t/ha) étaient nettement supérieures à celles utilisées dans notre étude (2 t/ha). Aussi, dans une étude utilisant du compost et présentant des doses plus faibles, Schmidt et al. (2014) ont comparé les traitements « Biochar seul 8 t/ha », « Compost seul 55 t/ha » et « Compost-Biochar » avec un traitement témoin. Dans ces conditions, ils n'ont observé aucun effet significatif du biochar seul, du compost seul ou du mélange compost-biochar sur la croissance et sur la fertilité de la vigne. Genesio et al. (2015) précisait également que l'augmentation de rendement liée au biochar était principalement due à une augmentation du poids des baies, le nombre de grappes étant resté similaire entre les modalités.

Dans leur méta-analyse, Jeffery et al. (2011) ont montré que le biochar exerçait un effet positif sur le rendement des cultures principalement lorsqu'il était appliqué sur des sols acides. Ils précisait également que dans les régions tempérées les effets sur le rendement étaient globalement neutres et pouvaient même être négatifs sur sols alcalins. Ces informations sont cohérentes avec les résultats de notre étude, menée exclusivement sur des parcelles présentant un pH élevé (pH eau = 8,4 et 8,5) (Tableau 1). Les augmentations de rendement observées après un apport de biochar seraient donc essentiellement liées à une meilleure disponibilité des nutriments, via l'augmentation du pH dans les sols acides.

6.3. Limites de l'étude, réflexions et pistes d'amélioration

Comme mentionné tout au long de cette étude, de nombreuses hétérogénéités étaient présentes sur les parcelles expérimentales : pente, bordure, vent, quantité de compost, type de couvert. La présence de ces biais a fortement compliqué l'interprétation des résultats et cela a conduit à de nombreuses hypothèses. Il convient donc de rester prudent quant aux conclusions de cette expérimentation, qui devra être poursuivie dans les années à venir afin d'apporter un éclairage plus précis.

Les conditions d'expérimentation étant relativement différentes entre les parcelles, notamment de par la conduite du couvert sur les inter-rangs, mais également de par les doses et le type de compost apporté (Tableau 2), les résultats ont été traités séparément. Cependant, il serait intéressant d'obtenir un réseau de parcelles expérimentales suffisamment important dans la région afin de réaliser une analyse globale, qui permettrait de trancher davantage sur les effets du biochar selon les conditions pédoclimatiques et les itinéraires techniques utilisés par les viticulteurs.

Cette étude souligne également certaines limites liées aux moyens humains, financiers et matériels disponibles. Plusieurs variables mériteraient d'être suivies avec davantage de répétitions, notamment le poids des 200 baies, mais également le suivi des apex et le rendement final durant la saison 2023-2024, ou bien la vitesse d'infiltration de l'eau. Ces mesures sont en effet très chronophages mais un nombre de répétitions plus élevé aurait permis d'obtenir des résultats statistiques plus pertinents. De plus, des analyses plus complètes portant sur les caractéristiques des différents biochars utilisés, particulièrement pour le biochar LABIN® (Annexe 6), sont nécessaires afin d'identifier celles qui présentent le plus fort intérêt. Enfin, pour la parcelle de Cournonterral, où la modalité T0 a montré des résultats contradictoires entre les mesures de disponibilité en eau et de poids des baies, il serait intéressant de réaliser une fosse pédologique afin d'étudier la zone racinaire réellement exploitée par la vigne.

Le nombre de tensiomètres par modalité, ainsi que leur état d'usure, en particulier sur les parcelles d'Adissan, soulèvent aussi quelques interrogations, compte tenu de la

variabilité parfois observée entre les mesures (Figure 6). De plus, l'étude de la disponibilité en eau du sol uniquement via des mesures tensiométriques, limitées par des appareils plafonnés à -199 kPa, constitue en elle-même l'une des principales limitations de cette expérimentation. En effet, il serait pertinent de compléter ces observations par des mesures de teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, qui permettraient d'estimer la réserve utile et, en particulier, la réserve en eau facilement utilisable par les plantes. Enfin, des mesures de potentiels hydriques foliaires permettraient de mieux caractériser le stress hydrique de la vigne, en renseignant sur l'eau réellement disponible dans la zone explorée par son système racinaire.

La présence de couverts végétaux sur l'ensemble des parcelles étudiées, qu'ils soient temporaires ou permanents, n'a que peu été abordée dans cette étude mais soulève également des interrogations quant aux interactions entre les différentes composantes du système (sol-biochar-eau-vigne-couvert). Dans cette expérimentation, le biochar a en effet été épandu en surface et sur les inter-rangs, c'est-à-dire dans la zone où s'exerce la principale compétition entre les racines de la vigne et celles du couvert. L'eau supplémentaire retenue par le biochar pourrait ainsi être majoritairement captée par le couvert plutôt que par la vigne, notamment lorsque celui-ci est permanent. Par ailleurs, l'âge des vignes de la parcelle de Cournonterral (8 ans), et principalement de celle d'Aspiran (52 ans), laisse supposer un système racinaire déjà bien développé en profondeur (Riffle et al., 2022). L'étude du plantier d'Adissan et de la parcelle de champ dans les années à venir pourrait ainsi fournir des informations complémentaires et enrichir l'interprétation des résultats. En particulier, le suivi de la disponibilité en eau sur la parcelle de champ qui ne comportera pas de couverts, se montrera très certainement intéressant l'année prochaine, suite aux pluies hivernales.

Pour finir, des expérimentations avec différentes conditions d'épandage seraient pertinentes et mériteraient d'être menées. Dans cette expérimentation, le choix d'un épandage sur l'inter-rang et non sur le rang visait à limiter un éventuel effet « goutte-à-goutte » qui aurait pu résulter de l'application du biochar. Cela avait donc pour objectif d'inciter les racines de la vigne à explorer le sol environnant. Cependant, d'autres expérimentations, comme celles menées par le CIVAM BIO 66, étudient l'effet du biochar sur la vigne lorsqu'il est appliqué en localisé sur le rang. Par ailleurs, le Domaine Lafage expérimente un apport de biochar en profondeur, lors de la replantation de certaines parcelles. Ces différentes approches offriront donc des résultats complémentaires et intéressants à discuter.

7. Conclusion

Cette expérimentation a mis en évidence des effets contrastés sur la disponibilité et l'infiltration de l'eau dans les sols suite aux amendements Compost-Biochar. Elle a néanmoins permis de souligner l'influence prépondérante du biochar, qu'elle soit positive ou négative, sur la modification de la disponibilité et de l'infiltration de l'eau dans les sols. L'impact s'est révélé variable selon les itinéraires techniques, la texture des sols, les conditions saisonnières de pluviométrie et la mise en place des expérimentations. La disponibilité en eau a alors été améliorée dans le sol à texture grossière de la parcelle de Cournonterral, tandis que des effets neutres ou négatifs ont été mis en évidence pour les sols à texture plus fine des parcelles d'Aspiran et d'Adissan. Le biochar a favorisé l'infiltration de l'eau, en particulier dans les sols limoneux-argileux. La pluviométrie a semblé jouer un rôle déterminant dans l'efficacité de l'amendement. Il semble qu'un biochar insuffisamment humidifié lors de son épandage conduise à une forte réduction de la disponibilité en eau des sols. Enfin, l'augmentation de la dose et la diminution de la granulométrie du biochar ont accentué les effets observés.

L'amendement Compost-Biochar a eu un effet positif, bien que très limité, sur la réduction du stress hydrique de la vigne. En revanche, concernant le rendement de la vigne et ses composantes, les amendements Compost-Biochar et Compost seul ont présenté des effets globalement neutres.

Étant donné que la vigne est une culture pérenne et que le biochar présente une importante stabilité dans les sols, il apparaît essentiel de poursuivre ces recherches sur le long terme. L'étude de l'utilisation du biochar dans des sols aux caractéristiques variées, notamment en termes de pH et de texture, semble particulièrement importante. Par ailleurs, une réflexion approfondie sur le type de biochar le plus adapté aux enjeux hydriques doit être poursuivie. Les recherches sont à enrichir quant aux effets synergiques et complémentaires qui peuvent résulter de l'association Compost-Biochar, notamment sur les questions liées à la disponibilité et à la rétention des nutriments dans les sols.

Enfin, la dose d'apport en biochar constitue un enjeu majeur. Des recherches sur l'utilisation de faibles doses doivent impérativement être conduites afin d'évaluer l'intérêt que représente le biochar dans des conditions financièrement envisageables pour les viticulteurs. Le coût extrêmement élevé du biochar (entre 700 et 5 000 €/t) constitue un frein important à son utilisation, surtout lorsque les bénéfices restent limités ou incertains. À ce titre, la production locale par les viticulteurs eux-mêmes, grâce à l'acquisition d'un four à biochar (environ 2 500 €) et à la valorisation des souches de vignes arrachées, apparaît comme une solution économiquement envisageable et mérite d'être explorée.

Pour conclure, les résultats de cette expérimentation ne permettent pas de statuer clairement sur l'intérêt que représente l'utilisation du biochar mais ils soulignent l'importance de prendre en compte le contexte pédoclimatique, la dose, les caractéristiques du biochar, ainsi que les pratiques culturales, pour optimiser ses effets et améliorer la résilience des vignobles face au stress hydrique. Ils ouvrent ainsi des pistes de réflexion et incitent à poursuivre les recherches.

Les expérimentations paysannes, réalisées en conditions réelles, sont d'ailleurs particulièrement riches puisqu'elles révèlent toute la complexité des interactions qui existent entre les différentes composantes d'un système. Ces projets soulignent aussi la forte implication des agriculteurs eux-mêmes, qui initient, portent et diffusent la recherche de pratiques innovantes. Le rapprochement entre sciences et savoirs empiriques apparaît ainsi essentiel pour le développement de nouvelles pratiques agroécologiques et mérite d'être renforcé.

Bibliographie :

Abiven S, Menasseri S, Chenu C. « The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis ». *Soil Biology and Biochemistry*. 2009.

Abrol V, Ben-Hur M, Verheijen FGA, Keizer JJ, Martins MAS, Tenaw H, et al. « Biochar effects on soil water infiltration and erosion under seal formation conditions: rainfall simulation experiment ». *J Soils Sediments*. 2016.

Aggelides SM, Londra PA. « Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil ». 2000

Acharya BS, Dodla S, Wang JJ, Pavuluri K, Darapuneni M, Dattamudi S, et al. « Biochar impacts on soil water dynamics: knowns, unknowns, and research directions ». *Biochar*. 2024.

Baronti S, Vaccari FP, Miglietta F, Calzolari C, Lugato E, Orlandini S, et al. « Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.) ». *European Journal of Agronomy*. 2014.

Baronti S, Magno R, Maienza A, Montagnoli A, Ungaro F, Vaccari FP. « Long term effect of biochar on soil plant water relation and fine roots: Results after 10 years of vineyard experiment ». *Science of The Total Environment*. 2022.

Basso AS, Miguez FE, Laird DA, Horton R, Westgate M. « Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils ». *GCB Bioenergy*. 2013.

Bhatt R, Roopinder SG, Arsh Alam SG. « Concept of soil water movement in relation to variable water potential ». *Advances in Life Sciences*. 2014.

Bohara H, Dodla S, Wang JJ, Darapuneni M, Acharya BS, Magdi S, et al. « Influence of poultry litter and biochar on soil water dynamics and nutrient leaching from a very fine sandy loam soil ». *Soil and Tillage Research*. 2019.

Brewer CE, Chuang VJ, Masiello CA, Gonnermann H, Gao X, Dugan B, et al. « New approaches to measuring biochar density and porosity ». *Biomass and Bioenergy*. 2014.

Brown S, Cotton M. « Changes in Soil Properties and Carbon Content Following Compost Application: Results of On-farm Sampling ». *Compost Science & Utilization*. 2011.

Campi P, Palumbo AD, Mastrorilli M. « Evapotranspiration estimation of crops protected by windbreak in a Mediterranean region ». *Agricultural Water Management*. 2012.

Capri C, Gatti M, Fiorini A, Ardenti F, Tabaglio V, Poni S. « A comparative study of fifteen cover crop species for orchard soil management: water uptake, root density traits and soil aggregate stability ». *Sci Rep*. 2023.

- Chaves M m., Santos T p., Souza C r., Ortuño M f., Rodrigues M l., Lopes C m., et al. « Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality ». *Annals of Applied Biology*. 2007.
- Cheng CH, Lehmann J, Thies JE, Burton SD, Engelhard MH. « Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes ». *Organic Geochemistry*. 2006.
- Cheng CH, Lehmann J, Engelhard MH. « Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence ». *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008.
- Deloire A, Ojeda H, Zebic O, Bernard N, Hunter JJ, Carbonneau A. « Influence de l'état hydrique de la vigne sur le style du vin ». 2006.
- Edeh IG, Mašek O, Buss W. « A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties – New insights and future research challenges ». *Science of The Total Environment*. 2020.
- Flexas J, Galmés J, Gallé A, Gulías J, Pou A, Ribas-Carbo M, et al. « Improving water use efficiency in grapevines: potential physiological targets for biotechnological improvement ». *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2010.
- Fornes F, Lidón A, Belda RM, Macan GPF, Cayuela ML, Sánchez-García M, et al. « Soil fertility and plant nutrition in an organic olive orchard after 5 years of amendment with compost, biochar or their blend ». *Sci Rep*. 2024.
- Gambetta GA. « Water Stress and Grape Physiology in the Context of Global Climate Change ». *Journal of Wine Economics*. 2016.
- Gelé L. « Recherche d'un itinéraire hydrique optimisé pour le rendement et la qualité des Rosés de Provence, dans la logique d'économie de la ressource en eau ». *Mémoire Institut Agro Montpellier*. 2023.
- Genesio L, Miglietta F, Baronti S, Vaccari FP. « Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: Results from a four years field experiment in Tuscany ». *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2015.
- Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W. « The « Terra Preta » phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics ». *Naturwissenschaften*. 2001.
- Glaser B, Lehmann J, Zech W. « Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review ». *Biology and Fertility of Soils*. 2002.
- Gray M., Johnson M.G., Dragila M.I., Kleber M. « Water uptake in biochars: the roles of porosity and hydrophobicity ». *Biomass Bioenergy*. 2014.

Guilpart N. « Relationships between ecosystem services provided by an agroecosystem with a perennial crop : trade-off between grapevine yield and powdery mildew regulation ». *Thèse Montpellier SupAgro*. 2014.

Hannah L, Roehrdanz PR, Ikegami M, Shepard AV, Shaw MR, Tabor G, et al. « Climate change, wine, and conservation ». *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013.

Honvault N, Nobile C, Faucon M, Firmin S, Houben D. « Direct and indirect interactions between biochar properties, plant belowground traits, and plant performance ». *GCB Bioenergy*. 2022.

Houben D, Hardy B, Faucon MP, Cornélis JT. « Effet du biochar sur la biodisponibilité du phosphore dans un sol limoneux acide ». 2017.

Hunter JJ, Volschenk CG, Zorer R. « Vineyard row orientation of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz/101-14 Mgt: Climatic profiles and vine physiological status ». *Agricultural and Forest Meteorology*. 2016.

Intergovernmental Panel On Climate Change. « Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems ». *Cambridge University Press*. 2022.

Joseph SD, Camps-Arbestain M, Lin Y, Munroe P, Chia CH, Hook J, et al. « An investigation into the reactions of biochar in soil ». *Soil Res*. 2010.

Joseph S, Cowie AL, Van Zwieten L, Bolan N, Budai A, Buss W, et al. « How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar ». *GCB Bioenergy*. 2021.

Lebon E, Pellegrino A, Louarn G, Lecoeur J. « Branch Development Controls Leaf Area Dynamics in Grapevine (*Vitis vinifera*) Growing in Drying Soil ». *Annals of Botany*. 2006.

Lanari V, Pallotti L, Lattanzi T, Silvestroni O. « Grapevine Root Distribution and Density in Deep Soil Layers Under Different Soil Management Practices ». *Plants*. 2025.

Lehmann J, « Bio-energy in the black ». *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2007.

Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. « Biochar effects on soil biota – A review ». *Soil Biology and Biochemistry*. 2011.

Liu J, Schulz H, Brandl S, Miehtke H, Huwe B, Glaser B. « Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions ». *Z Pflanzenernähr Bodenkd*. 2012.

Lopes CM, Santos TP, Monteiro A, Rodrigues ML, Costa JM, Chaves MM. « Combining cover cropping with deficit irrigation in a Mediterranean low vigor vineyard ». *Scientia Horticulturae*. 2011.

Mao J, Zhang K, Chen B. « Linking hydrophobicity of biochar to the water repellency and water holding capacity of biochar-amended soil ». *Environmental Pollution*. 2019.

Medrano H, Tomás M, Martorell S, Escalona JM, Pou A, Fuentes S, et al. « Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review ». *Agron Sustain Dev*. 2015.

Ndede EO, Kurebito S, Idowu O, Tokunari T, Jindo K. « The Potential of Biochar to Enhance the Water Retention Properties of Sandy Agricultural Soils ». *Agronomy*. 2022.

Omondi MO, Xia X, Nahayo A, Liu X, Korai PK, Pan G. « Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data ». *Geoderma*. 2016.

Pichon L, Brunel G, Payan JC, Taylor J, Bellon-Maurel V, Tisseyre B. « ApeX-Vigne: experiences in monitoring vine water status from within-field to regional scales using crowdsourcing data from a free mobile phone application ». *Precision Agric*. 2021.

Pradhan S, Lahlou FZ, Ghat I, Bilal H, McKay G, Al-Ansari T. « A comprehensive decision-making approach for the application of biochar in agriculture to enhance water security: A GIS-AHP based approach ». *Environmental Technology & Innovation*. 2024.

Puri L, Hu Y, Naterer G. « Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis ». *Front Fuels*. 2024.

Ramos MC. « Effects of compost amendment on the available soil water and grape yield in vineyards planted after land levelling ». *Agricultural Water Management*. 2017.

Razzaghi F, Obour PB, Arthur E. « Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis ». *Geoderma*. 2020.

Riffle VL, Arredondo JA, LoMonaco I, Appel C, Catania AA, Dodson Peterson JC, et al. « Vine Age Affects Vine Performance, Grape and Wine Chemical and Sensory Composition of cv. Zinfandel from California ». *Am J Enol Vitic*. 2022.

Saurin N, Tisseyre B, Lebon E. « Comment mesurer la contrainte hydrique de la vigne, de la plante au vignoble ». *Innovations Agronomiques*. 2014.

Schmidt HP, Kammann C, Niggli C, Evangelou MWH, Mackie KA, Abiven S. « Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality ». *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2014.

Serra I, Strever A, Myburgh PA, Deloire A. « Review: the interaction between rootstocks and cultivars (*Vitis vinifera* L.) to enhance drought tolerance in grapevine: Rootstocks to

enhance drought tolerance in grapevine ». *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2014.

Sohi SP, Krull E, Lopez-Capel E, Bol R. « A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. In: *Advances in Agronomy* ». *Elsevier*. 2010.

Toková L, Igaz D, Horák J, Aydin E. « Effect of Biochar Application and Re-Application on Soil Bulk Density, Porosity, Saturated Hydraulic Conductivity, Water Content and Soil Water Availability in a Silty Loam Haplic Luvisol ». *Agronomy*. 2020.

Tomás M, Medrano H, Brugnoli E, Escalona JM, Martorell S, Pou A, et al. « Variability of mesophyll conductance in grapevine cultivars under water stress conditions in relation to leaf anatomy and water use efficiency: Genotypic variability of mesophyll conductance ». *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2014.

Tramontini S, Vitali M, Centioni L, Schubert A, Lovisolo C. « Rootstock control of scion response to water stress in grapevine ». *Environmental and Experimental Botany*. 2013.

Tryon EH. « Effect of Charcoal on Certain Physical, Chemical, and Biological Properties of Forest Soils ». *Ecological Monographs*. 1948.

Van Leeuwen C, Trégoat O, Choné X, Bois B, Pernet D, Gaudillère JP. « Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? » *OENO One*. 2009.

Wang D, Li C, Parikh SJ, Scow KM. « Impact of biochar on water retention of two agricultural soils – A multi-scale analysis ». *Geoderma*. 2019.

Weber J, Karczewska A, Drozd J, Licznar M, Licznar S, Jamroz E, et al. « Agricultural and ecological aspects of a sandy soil as affected by the application of municipal solid waste composts ». *Soil Biology and Biochemistry*. 2007.

Wei B, Peng Y, Lin L, Zhang D, Ma L, Jiang L, Li Y, He T, Wang Z. « Drivers of biochar-mediated improvement of soil water retention capacity based on soil texture: A meta-analysis ». *Geoderma*. 2023

Xiao Q, Zhu L xia, Shen Y fang, Li S qing. « Sensitivity of soil water retention and availability to biochar addition in rainfed semi-arid farmland during a three-year field experiment ». *Field Crops Research*. 2016.

Yi S., Witt B., Chiu P., Guo M., Imhoff P. « The Origin and Reversible Nature of Poultry Litter Biochar Hydrophobicity ». *J. Environ. Qual.* 2015.

Zhang Q, Wang S, Li L, Inoue M, Xiang J, Qiu G, et al. « Effects of mulching and sub-surface irrigation on vine growth, berry sugar content and water use of grapevines ». *Agricultural Water Management*. 2014.

Zhang J, Amonette JE, Flury M. « Effect of biochar and biochar particle size on plant-available water of sand, silt loam, and clay soil ». *Soil and Tillage Research*. 2021.

Zong Y, Wang Y, Sheng Y, Wu C, Lu S. « Ameliorating soil acidity and physical properties of two contrasting texture Ultisols with wastewater sludge biochar ». *Environ Sci Pollut Res*. 2018.

Direction Régionale de l’Alimentation, de l’Agriculture et de la Forêt (DRAAF) Occitanie. Territoire : Hérault (34) [Internet]. 2020 [cité 2025-09-08]. Disponible sur : https://draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr/IMG/html/fiche_irrigation_herault_34_-2.html

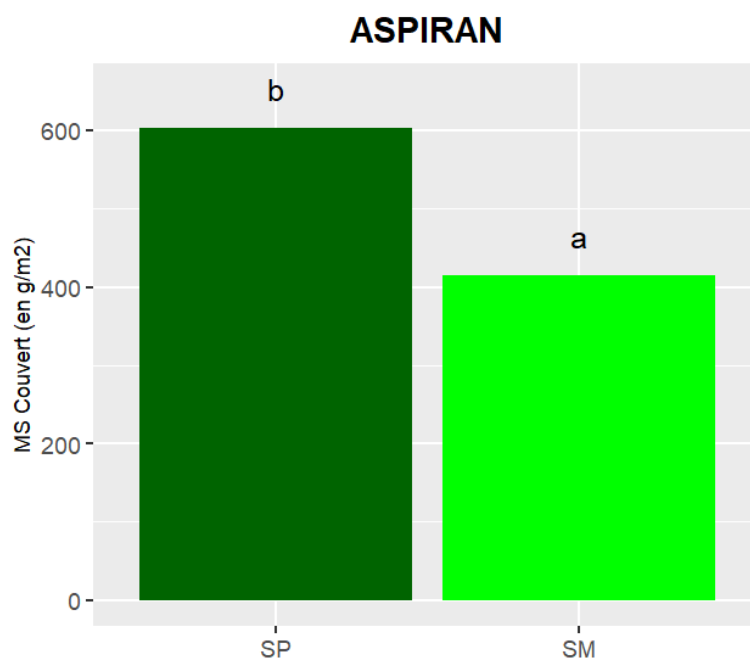
Région Occitanie. Feuille de route COP Occitanie [Internet]. 2025 [cité 2025-09-08]. Disponible sur : https://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/feuille_de_route_cop.pdf

Direction Régionale de l’Alimentation, de l’Agriculture et de la Forêt (DRAAF) Occitanie. Étude Agreste RA20 Hérault – Juillet 2022 [Internet]. 2022 [cité 2025-09-08]. Disponible sur : https://draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/agreste_etude_ra20_herault_20072022.pdf

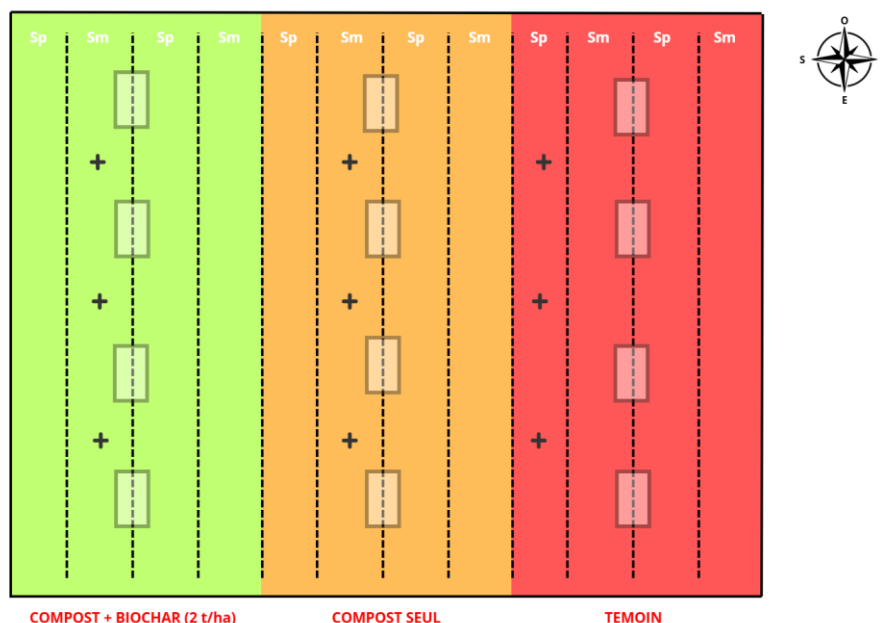
Météo-France. Fiche climatologique [Internet]. [s.d.] [cité 2025-09-08]. Disponible sur : https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=117&id_rubrique=39

Annexes

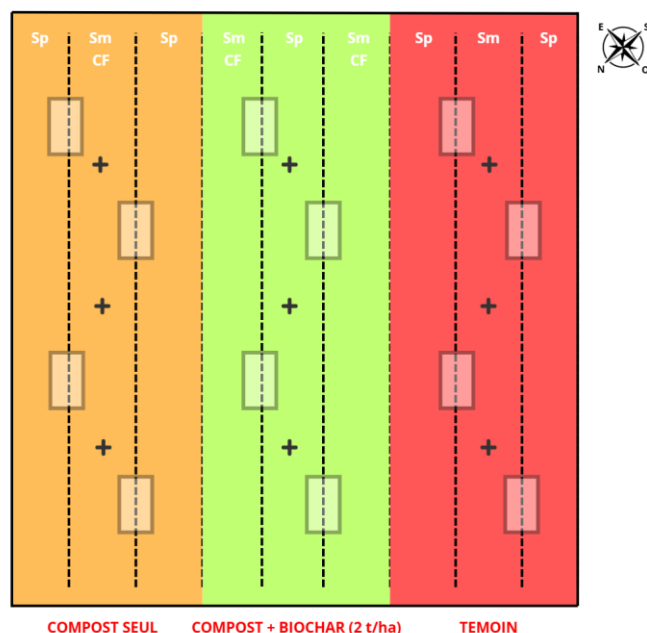
Annexe 1. Diagramme en barres présentant la masse sèche (MS) des couverts obtenue sur la parcelle d'Aspiran durant la saison 2024-2025, en fonction du type de couvert. SP (vert foncé) = Inter-rang avec Couvert Spontané. SM (vert clair) = Inter-rang avec Couvert Semé.



Annexe 2. Cartographie expérimentale spécifique à chacune des parcelles.

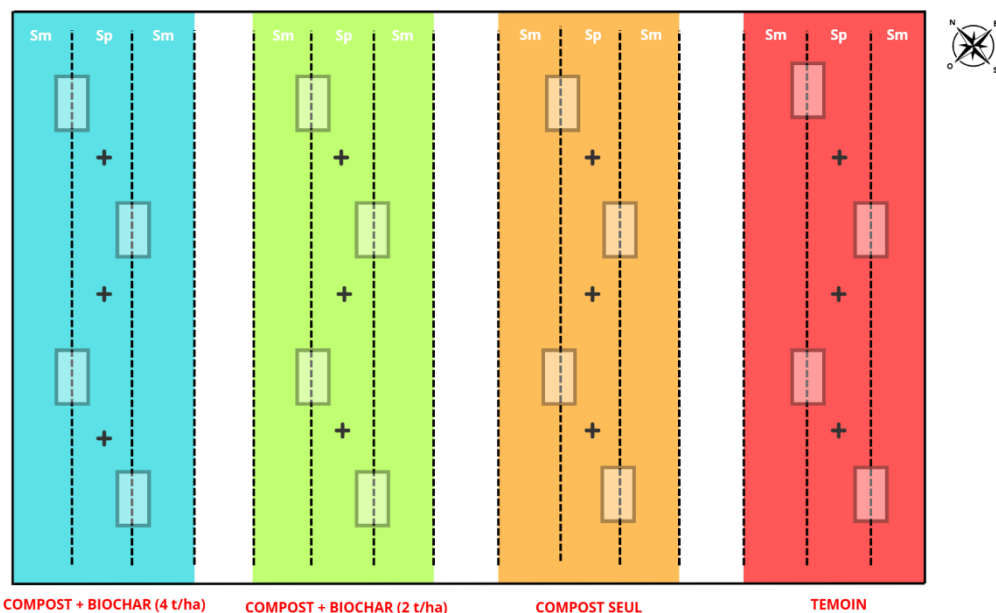


Annexe 2.1. Cartographie de l'expérimentation mise en place sur la parcelle de Cournonterral pour la saison 2024-2025. Vert = Modalité Compost de Déchets Verts (10 t/ha) + Biochar LABIN® (2 t/ha) ; Orange = Modalité Compost de Déchets Verts (10 t/ha) ; Rouge = Témoin (Aucun amendement). Sm = Inter-rang avec Couvert Semé ; Sp = Inter-rang avec Couvert Spontané. Les lignes pointillées représentent l'emplacement des rangs de vignes, les croix indiquent l'emplacement des tensiomètres et les rectangles transparents celui des placettes.



Annexe 2.2. Cartographie de l'expérimentation mise en place sur la parcelle d'Aspiran pour la saison 2024-2025. Orange = Modalité Compost de Fumier d'Ovins (8 t/ha) + Compost de Déchets Verts (4 t/ha) ; Vert = Modalité Compost de Fumier d'Ovins (8 t/ha) + Compost de Déchets Verts (4 t/ha) + Biochar LABIN® (2 t/ha) ; Rouge = Témoin (Aucun amendement). Sm = Inter-rang avec Couvert Semé ; Sp = Inter-rang avec

Couvert Spontané. CF = Compost de Fumier de Cheval (8 t/ha). Les lignes pointillées représentent l'emplacement des rangs de vignes, les croix indiquent l'emplacement des tensiomètres et les rectangles transparents celui des placettes.



Annexe 2.3. Cartographie de l'expérimentation mise en place sur la parcelle d'Adissan pour la saison 2024-2025. Bleu = Modalité Compost de Déchets Verts (9 t/ha) + Biochar LABIN® (4 t/ha) ; Vert = Modalité Compost de Déchets Verts (9 t/ha) + Biochar LABIN® (2 t/ha) ; Orange = Modalité Compost de Déchets Verts (9 t/ha) ; Rouge = Témoin (Aucun amendement). Sm = Inter-rang avec Couvert Semé ; Sp = Inter-rang avec Couvert Spontané. Les lignes pointillées représentent l'emplacement des rangs de vignes, les croix indiquent l'emplacement des tensiomètres et les rectangles transparents celui des placettes.

Annexe 3. Résultats des tests sur l'activité biologique des sols (test du slip en coton et test SituResp).

Pour la parcelle d'Aspiran, l'annexe 3.1 met en évidence une dégradation légèrement plus importante dans les modalités CBr et COMP (moyennes = 2,3/5) que dans la modalité T0 (moyenne = 1,3/5).

 T0 1-2-1 => 1,3 / 5	 COMP 3-2-2 => 2,3 / 5
 CBr 2-2-3 => 2,3 / 5	 Slip neuf

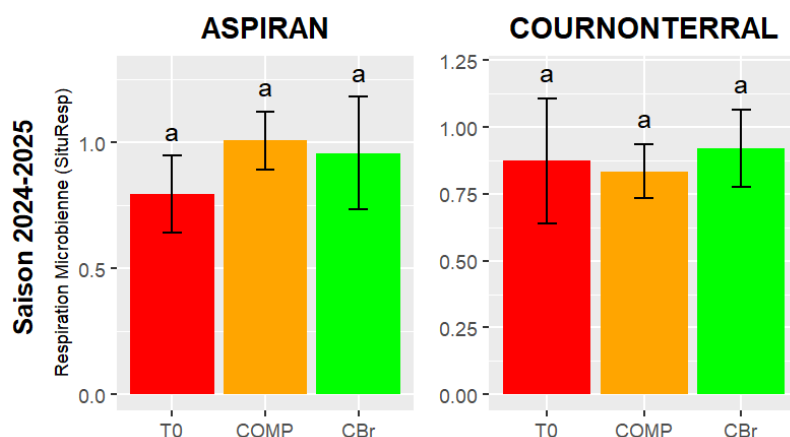
Annexe 3.1. Photos des slips en coton déterrés sur chacune des modalités de la parcelle d'Aspiran, pour la saison 2023-2024. Les chiffres présentés correspondent aux notes attribuées à chacun des slips et à la moyenne obtenue pour chacune des modalités. Cette échelle de notations reste très subjective. T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement) ; COMP (orange) = Compost Seul (12 t/ha) ; CBr (vert) = Compost (12 t/ha) + Biochar LABIN® (2 t/ha).

Pour la parcelle de Cournonterral, l'annexe 3.2 met en évidence une dégradation légèrement plus importante dans la modalité CBr (moyenne = 4/5), suivi de la modalité T0 (moyenne = 3,7/5) et enfin de la modalité COMP (moyenne = 3,3/5).

 T0 4-3-4 => 3,7 / 5	 COMP 3-3-4 => 3,3 / 5
 CBr 5-3-4 => 4 / 5	 Slip neuf

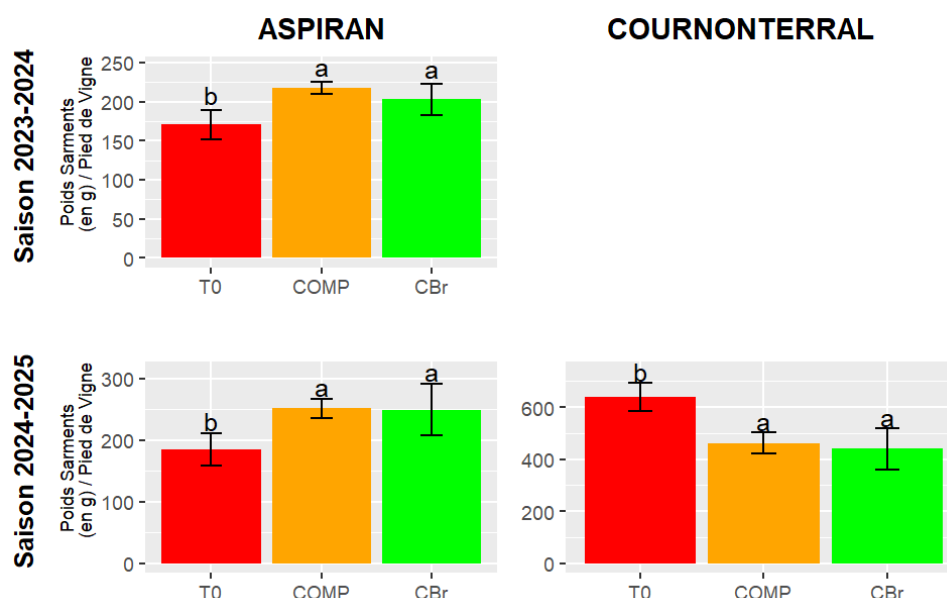
Annexe 3.2. Photos des slips en coton déterrés sur chacune des modalités de la parcelle de Cournonterral, pour la saison 2023-2024. Les chiffres présentés correspondent aux notes attribuées à chacun des slips et à la moyenne obtenue pour chacune des modalités. Cette échelle de notations reste très subjective. T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement) ; COMP (orange) = Compost Seul (12 t/ha) + Biochar LABIN® (2 t/ha).

L'annexe 3.3 montre qu'aucune différence significative entre les modalités testées n'est observée, aussi bien pour la parcelle d'Aspiran que pour celle de Cournonterral. Sur la parcelle d'Aspiran, la modalité T0 présente cependant une respiration microbienne moyenne légèrement inférieure aux modalités COMP et CBr.



Annexe 3.3. Diagrammes en barres présentant la respiration microbienne obtenue via le test SituResp dans les sols des deux parcelles expérimentales (Aspiran et Cournonterral) pour la saison 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées. T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement) ; COMP (orange) = Compost Seul ; CBr (vert) = Compost + Biochar (2 t/ha). Les IC95 sont représentés et les lettres permettent d'identifier les différences significatives.

Annexe 4. Diagrammes en barres présentant le poids moyen des sarments / pied de vigne dans les deux parcelles expérimentales (Aspiran et Cournonterral) pour les saisons 2023-2024 et 2024-2025, en fonction des différentes modalités testées. T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement) ; COMP (orange) = Compost Seul ; CBr (vert) = Compost + Biochar (2 t/ha). Les IC95 sont représentés et les lettres permettent d'identifier les différences significatives.



Sur la parcelle d'Aspiran, pour la saison 2024-2025, le poids des sarments par pied de vigne (Annexe 4) est significativement plus élevé sur les modalités COMP et CBr comparées à la modalité T0 (+35 % en moyenne). Une différence similaire avait déjà été observée lors de la saison précédente, avant la mise en place de l'expérimentation (respectivement +27 % et +19 %), signe d'une hétérogénéité déjà présente.

Sur la parcelle de Cournonterral, pour la saison 2024-2025, le poids des sarments par pied de vigne (Annexe 4) est significativement plus faible sur les modalités COMP et CBr comparées à la modalité T0 (respectivement -28 % et -31 %). Les données de la saison 2023-2024, avant la mise en place de l'expérimentation, ayant été perdues, il est compliqué d'affirmer que cette différence soit due à l'expérimentation.

Annexe 5. Synthèse des dates et des périodes de mesures.

	COURNONTERRAL <i>Nicolas GUIZARD</i>	ASPIRAN <i>Julien PEYRAS</i>	ADISSAN <i>Frédéric SALBAT</i>
Période Suivis Tensiométrie Sol	<u>Saison 1</u> : 25/04/24- 06/08/24 <u>Saison 2</u> : 11/02/25- 31/08/25	<u>Saison 1</u> : 25/04/24- 06/08/24 <u>Saison 2</u> : 11/02/25- 31/08/25	24/04/25-31/08/25
Période Suivis Apex	<u>Saison 1</u> : 06/05/24- 06/08/24 <u>Saison 2</u> : 07/05/25- 02/07/25	<u>Saison 1</u> : 06/05/24- 06/08/24 <u>Saison 2</u> : 07/05/25- 02/07/25	07/05/25-02/07/25
Période Suivis Croissance	/	/	14/05/25-25/06/25
Date Comptage Grappes	<u>Saison 1</u> : 22/05/24 <u>Saison 2</u> : 08/07/25	<u>Saison 1</u> : 17/05/24 <u>Saison 2</u> : 08/07/25	13/06/25
Date Vendange et Poids 200 Baies	<u>Saison 1</u> : 11/09/24 <u>Saison 2</u> : 01/09/25	<u>Saison 1</u> : 18/09/24 <u>Saison 2</u> : 21/08/25	/
Date Pesée Sarments	<u>Saison 1</u> : 15/12/23 <u>Saison 2</u> : 11/02/25	<u>Saison 1</u> : 15/12/23 <u>Saison 2</u> : 11/02/25	/
Date Test Beerkan	21/05/25	23/05/25	22/05/25

Annexe 6. *Caractéristiques détaillées des biochars testés.*

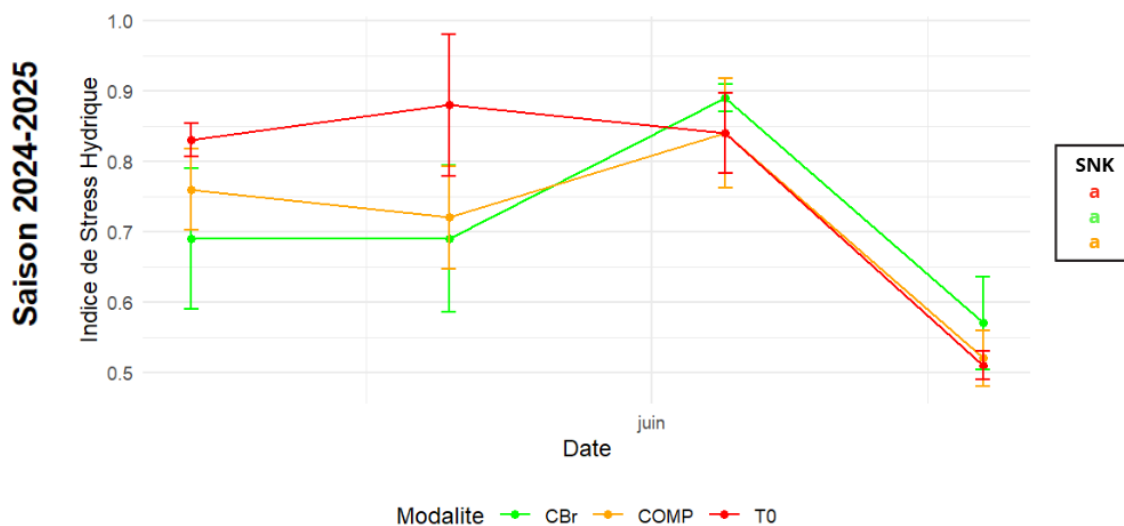
	LABIN	Terra Fertilis	MIRAÏA	GIEE VVM
MO Utilisée	?	Biomasse forestière de résineux	Bois de feuillus et de résineux	Souches de vignes arrachées
Processus de Fabrication	?	Pyrolyse lente à haute température (500-700°C)	Pyrolyse lente à haute température (> 550°C)	Pyrolyse rapide à haute température (≈ 600°C)
Granulométrie	0-2 mm	0-2 mm	0-25 mm	0-50 mm
Teneur en Carbone	?	93,9%	82,9%	?
Teneur en Cendres	?	?	8,1%	?
pH	?	9,5	8,7	?
Surface Spécifique	?	400 m2/g	140 m2/g	?
Densité Apparente	?	400 kg/m3	?	≈ 250 kg/m3
Rapport H/Corg	?	0,1	?	?
Prix / Coût	Entre 630 €/t et 790 €/t HT	4 600 €/t HT	850 €/t HT	Four Kon Tiki = 2 500 € 1t de biochar = 12h de W

Annexe 7. Synthèse des modèles statistiques utilisés pour le traitement des données.

Variable	Site	Saison	Méthode d'analyse statistique
Tensiométrie Sol	Aspiran	2023-2024	Modèle linéaire à 2 facteurs (Modalité + Date) sans interaction + ANOVA + SNK
Tensiométrie Sol	Aspiran	2024-2025	Modèle linéaire à 2 facteurs (Modalité + Date) sans interaction + ANOVA + SNK
Tensiométrie Sol	Cournonterral	2023-2024	Modèle linéaire à 2 facteurs (Modalité + Date) avec interaction (Modalité*Date) + ANOVA + SNK
Tensiométrie Sol	Cournonterral	2024-2025	Modèle linéaire à 2 facteurs (Modalité + Date) sans interaction + ANOVA + SNK
Tensiométrie Sol	Adissan	2024-2025	Modèle linéaire à 2 facteurs (Modalité + Date) sans interaction + ANOVA + SNK
Tensiométrie Sol	Champ	2024-2025	Modèle linéaire à 3 facteurs (Type + Dose + Date) avec 2 interactions (Type*Dose + Date*Dose)+ ANOVA + SNK
Vitesse Infiltration Eau	Aspiran	2024-2025	Modèle linéaire à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + SNK
Vitesse Infiltration Eau	Cournonterral	2024-2025	Modèle linéaire à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + SNK
Vitesse Infiltration Eau	Adissan	2024-2025	Modèle linéaire à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + SNK
IC-Apex	Aspiran	2023-2024	Modèle linéaire à 2 facteurs (Modalité + Date) + ANOVA + SNK
IC-Apex	Aspiran	2024-2025	Modèle linéaire à 2 facteurs (Modalité + Date) sans interaction + ANOVA + SNK
IC-Apex	Cournonterral	2023-2024	Modèle linéaire à 2 facteurs (Modalité + Date) + ANOVA + SNK

IC-Apex	Cournonterral	2024-2025	Modèle linéaire à 2 facteurs (Modalité + Date) sans interaction + ANOVA + SNK
IC-Apex	Adissan	2024-2025	Modèle linéaire à 2 facteurs (Modalité + Date) sans interaction + ANOVA + SNK
Nombre Grappes / Pied	Aspiran	2023-2024	Modèle linéaire généralisé de type Poisson à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + Emmeans
Nombre Grappes / Pied	Aspiran	2024-2025	Modèle linéaire généralisé de type Poisson à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + Emmeans
Nombre Grappes / Pied	Cournonterral	2023-2024	Modèle linéaire généralisé de type Poisson à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + Emmeans
Nombre Grappes / Pied	Cournonterral	2024-2025	Modèle linéaire généralisé de type Poisson à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + Emmeans
Nombre Grappes / Pied	Adissan	2024-2025	Modèle linéaire généralisé de type Poisson à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + Emmeans
Rendement / Pied	Aspiran	2023-2024	Modèle linéaire à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + SNK
Rendement / Pied	Aspiran	2024-2025	Modèle linéaire à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + SNK
Rendement / Pied	Cournonterral	2023-2024	Modèle linéaire à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + SNK
Rendement / Pied	Cournonterral	2024-2025	Modèle linéaire à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + SNK
Poids Sarments / Pied	Aspiran	2023-2024	Modèle linéaire à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + SNK
Poids Sarments / Pied	Aspiran	2024-2025	Modèle linéaire à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + SNK
Poids Sarments / Pied	Cournonterral	2024-2025	Modèle linéaire à 1 facteur (Modalité) + ANOVA + SNK

Annexe 8. Evolution de l'indice moyen de stress hydrique (IC-Apex) sur le site de Cournonterral durant la saison 2024-2025 (07/05/25-19/06/25) en fonction des différentes modalités testées. CBr (vert) = Compost + Biochar LABIN® (2 t/ha) ; COMP (orange) = Compost Seul ; T0 (rouge) = Témoin (Aucun amendement). Ici, les IC95 sont représentés puisque cinq IC-Apex ont été calculés pour chaque date et pour chaque modalité. L'encadré présente les résultats obtenus suite aux tests ANOVA et SNK. Les lettres indiquent la significativité des différences observées. La couleur des lettres permet d'identifier les modalités. L'ordre des lettres représente le classement des différentes modalités en fonction de leur IC-Apex moyen (du plus élevé au plus faible).



Annexe 9. Synthèse des résultats obtenus vis-à-vis de la modalité Témoin (T0) pour l'ensemble des variables étudiées, des parcelles, des saisons et des modalités testées. La couleur verte souligne la présence d'un effet positif lié à la modalité qui est comparée au témoin. La couleur rouge souligne la présence d'un effet négatif. Les mots en gras permettent d'identifier les différences qui sont statistiquement significatives. La colonne « Diff CBr/COMP » présente l'effet de CBr par rapport à COMP (positif, négatif ou neutre).

Variable mesurée	Site	Saison	Modalité	Différence par rapport à T0 (en %)	Significativité	Diff CBr / COMP
Tensiométrie du Sol	Aspiran	2023-2024	COMP	-23%	OUI	
			CBr	+4%	NON	-
	Aspiran	2024-2025	COMP	-13%	OUI	
			CBr	+3%	NON	-
	Cournonterral	2023-2024	COMP	-8%	NON	
			CBr	-35%	OUI	+
	Cournonterral	2024-2025	COMP	+6%	OUI	
			CBr	-5%	OUI	+
	Adissan	2024-2025	COMP	+16%	NON	
			CBr	+39%	OUI	-
			CBrDD	+16%	NON	/
	Champ	2024-2025	LAB	+84%	OUI	
			TF	+ 82%	OUI	
			GIEE	+61%	OUI	
			MIR	+ 44%	OUI	
Infiltration de l'Eau	Aspiran	2024-2025	COMP	-12%	NON	
			CBr	+204%	OUI	+
	Cournonterral	2024-2025	COMP	+24%	NON	
			CBr	+45%	NON	+
	Adissan	2024-2025	COMP	+13%	NON	
			CBr	+60%	NON	+
			CBrDD	+28%	NON	+

Respiration Microbienne	Aspiran	2024-2025	COMP	+27%	NON	
			CBr	+20%	NON	-
	Cournonterral	2024-2025	COMP	-4%	NON	
			CBr	+6%	NON	+
Apex	Aspiran	2023-2024	COMP	+14%	OUI	
			CBr	+11%	OUI	-
	Aspiran	2024-2025	COMP	+5%	OUI	
			CBr	+8%	OUI	+
	Cournonterral	2023-2024	COMP	+5%	OUI	
			CBr	+12%	OUI	+
	Cournonterral	2024-2025	COMP	-7%	NON	
			CBr	-7%	NON	/
	Adissan	2024-2025	COMP	+1%	NON	
			CBr	+5%	NON	+
			CBrDD	+8%	OUI	+
Nombre de Grappes / Pied	Aspiran	2023-2024	COMP	+8%	NON	
			CBr	+3%	NON	-
	Aspiran	2024-2025	COMP	+19%	NON	
			CBr	+20%	NON	+
	Cournonterral	2023-2024	COMP	+4%	NON	
			CBr	-3%	NON	-
	Cournonterral	2024-2025	COMP	+21%	NON	
			CBr	-13%	NON	-
	Adissan	2024-2025	COMP	-10%	NON	
			CBr	-12%	NON	-
			CBrDD	-2%	NON	+

Rendement / Pied	Aspiran	2023-2024	COMP	-14%	NON	
			CBr	+1%	NON	+
	Cournonterral	2023-2024	COMP	-14%	NON	
			CBr	-12%	NON	+
	Aspiran	2024-2025	COMP	+37%	NON	
			CBr	+33%	NON	-
Poids 200 Baies	Cournonterral	2024-2025	COMP	-22%	NON	
			CBr	-33%	OUI	-
	Aspiran	2023-2024	COMP	+19%	/	
			CBr	+5%	/	-
	Cournonterral	2023-2024	COMP	-7%	/	
			CBr	+3%	/	+
Poids 50 Baies	Aspiran	2024-2025	COMP	0%	/	
			CBr	+6%	/	+
	Cournonterral	2024-2025	COMP	-13%	/	
			CBr	-14%	/	-
	Aspiran	2024-2025	COMP	0%	NON	
			CBr	+6%	NON	+
Poids Sarments / Pied	Cournonterral	2024-2025	COMP	-13%	OUI	
			CBr	-14%	OUI	-
	Aspiran	2023-2024	COMP	+27%	OUI	
			CBr	+19%	OUI	-
	Aspiran	2024-2025	COMP	+36%	OUI	
			CBr	+35%	OUI	-
	Cournonterral	2024-2025	COMP	-28%	OUI	
			CBr	-31%	OUI	-