CLIMED-FRUIT

CULTURES PÉRENNES MÉDITERRANÉENNES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Revue thématique

Ce projet a reçu un financement du programme de Recherche et Innovation Horizon Europe de l'Union Européenne dans le cadre de la convention de subvention n°101060474.



SOMMAIRE

CHAPITRE 1: Conservation des sols et stockage du carbone 5

Amendements organiques: coup de projecteur sur quelques bonnes pratiques 6

Pratiques basées sur l'utilisation de compost 6

Paillage 9

Résidus et sous-produits de culture 9

Utilisation des résidus d'élagage 9

Recyclage des sous-produits agricoles 10

Biochar 10

Comparaison de différents amendements pour le stockage du carbone dans le sol 10

Enherbement et réduction du travail du sol pour les cultures pérennes afin d'améliorer la qualité du sol 11

Enherbement 11

Gestion du couvert permanent spontané dans les vergers d'amandiers 11

Enherbement sous le rang 12

Engrais vert et culture intercalaire 12

Exemple de mise en place d'engrais verts dans un vignoble méditerranéen 12

Atteindre les objectifs de l'initiative 4‰ dans les oliveraies grâce aux cultures intercalaires 12

Comparaison des couverts végétaux et de leurs effets sur le sol dans les vergers de cerisiers et d'amandiers 13

Pratiques de conservation des sols (Techniques culturales simplifiées TCS) 14

Agroforesterie et haies pour le stockage du carbone et la conservation des sols 14

Agroforesterie 14

Haies 15

Simulation du stockage du carbone par les haies en viticulture 15

References 16

Chapitre 2: Améliorer la résilience des cultures face aux aléas climatiques ... 17

Résistance à la sécheresse extrême et aux vagues de chaleur ... 18
Les filets d'ombrage pour réduire l'exposition ... 18
Les applications foliaires : un outil supplémentaire ... 19
Quelques leviers d'action sur le sol et le matériel végétal ... 19
Utilisation de méthodes de paillage et de couverts végétaux ... 19
L'agroforesterie : impact sur le microclimat de la parcelle ... 21
Protection des cultures contre la grêle ... 22
Protective nets ... 22
Les filets de protection : une action mécanique efficace ... 22
Les canons anti-grêle : agir en amont ... 22
Prévention des dégâts causés par le gel de printemps ... 23
Les méthodes existantes de lutte contre le gel ... 23
Les pratiques agricoles pour atténuer les risques ... 24
Taille hivernale tardive: exemple en viticulture ... 24
Pratiques de gestion des sols ... 24
Carte agroclimatique : anticiper la plantation des avocatiers en Espagne ... 25
Choix de variétés / porte-greffes tardifs ... 25
Prévenir l'érosion des sols ... 26
La mise en place de couverts végétaux ... 26
Les techniques culturales simplifiées ... 26
Lutte contre les nouveaux ravageurs ... 26
Dommages directs ... 26
Popillia japonica ... 26
Les cicadelles de la vigne ... 27
Dommages indirects ... 28
Xylella fastidiosa ... 28
References ... 29

Chapitre 3: Gérer le manque d'eau: pratiques innovantes et techniques d'agriculture sèche ... 31

Techniques d'irrigation avancées ... 32
Mise en place d'un système d'irrigation traditionnel économe en eau ... 32
Irrigation au goutte-à-goutte ... 32
Systèmes d'irrigation intelligents ... 34
Exemple en viticulture ... 34
Exemple pour un vignoble de raisin de table ... 35
Exemple pour un verger d'avocatiers ... 35
Exemple pour un verger d'agrumes ... 37
Exemple pour un verger d'amandiers ... 37
Exemple en oléiculture ... 38
Pratiques d'agriculture sèche ... 38
Les hydrogels : des polymères super absorbants ... 38
Le biochar : un atout pour améliorer la rétention d'eau dans le sol ... 38
Les pratiques de gestion des sols en faveur de l'eau ... 39
Keylines ... 39
Valorisation des ressources d'eau existantes ... 40
Désalinisation ... 40
Réutilisation des eaux usées ... 41
Réutilisation de l'eau et irrigation agricole: cadre réglementaire ... 41
Impacts agronomiques ... 42
Qualité de l'eau d'irrigation : un enjeu central ... 42
References ... 44

Chapitre 4: Préserver la biodiversité pour une meilleure résilience face aux enjeux du changement climatique **45**

Préserver la diversité des cultures **46**
Éviter le risque d'érosion génétique **46**
Perte de diversité génétique pour les cultures pérennes dans la région méditerranéenne 47
Préserver les ressources génétiques en région méditerranéenne 47
Potentiel des variétés anciennes et sauvages face aux défis climatiques **47**
La diversité génétique comme levier contre les maladies **48**
Création de nouvelles variétés: l'exemple des variétés résistantes 48
La sélection des porte-greffes comme stratégie de lutte contre les maladies 48
Améliorer la biodiversité À l'echelle de la parcelle et de l'exploitation **49**
Les cultures intercalaires **49**
La couverture des sols **49**
L'enherbement spontané: un allié naturel pour stimuler la biodiversité 49
Les couverts végétaux intermédiaires: améliorer la santé des sols et la diversité microbienne 50
Paillage: le recyclage au service de la biodiversité 51
Systèmes agroforestiers, bandes tampons et haies **51**
Impact sur la biodiversité aérienne 52
Impact sur les vers de terre 52
Impact sur la microbiologie du sol 52
Encourager la présence des pollinisateurs **52**
Restauration et amélioration de l'habitat des pollinisateurs dans les vergers **53**
Encourager la présence d'auxiliaires pour lutter contre les ravageurs **54**
Pratiques culturales pour la lutte contre les ravageurs: exemple du rôle des couverts végétaux **54**
Lutte biologique: utiliser la nature pour lutter contre les ravageurs **54**
Exemples de lutte biologique dans les agrumes 55
Exemples de lutte biologique dans les vergers de fruits à noyau 56
Exemples de lutte biologique en viticulture 56
References **57**

Chapitre 5: Diversification et adaptation des systèmes alimentaires au changement climatique **59**

Innovations en matière de transformation **60**
Adaptation post-récolte: innovations en matière d'emballage **60**
Adaptation des processus alimentaires **61**
Exemple en œnologie: méthodes d'acidification et de désalcoolisation 61
Optimisation des processus pour réaliser des économies d'énergie 63
Outils de surveillance - exemple en œnologie 63
Réutiliser les sous-produits et les coproduits 64
Diversification et stratégies d'adaptation à l'échelle de l'exploitation **65**
Diversification des cultures pour une résilience économique et environnementale **65**
Diversification des revenus et développement du marché **65**
Améliorer les compétences du personnel: exemple d'une exploitation viticole **66**
References **67**

Conclusion **69**

INTRODUCTION

La région méditerranéenne est particulièrement exposée aux effets du changement climatique : hausse des températures, sécheresses prolongées, précipitations irrégulières. Ces phénomènes menacent la productivité agricole, la stabilité des écosystèmes et la pérennité des cultures emblématiques comme l'olivier, la vigne ou les agrumes. Pour faire face à ces défis, des pratiques innovantes et durables sont nécessaires afin de renforcer la résilience, préserver la biodiversité et limiter les impacts environnementaux.

Ce document présente un ensemble de stratégies adaptées au contexte méditerranéen : conservation des sols, gestion de l'eau, préservation de la biodiversité et adaptation de la chaîne agroalimentaire. Il met en lumière l'importance de la santé des sols (amendements organiques, paillage, réduction du travail du sol), des techniques d'irrigation avancées (irrigation déficitaire, systèmes intelligents), et du rôle clé de la biodiversité (conservation des ressources génétiques, associations culturales, agroforesterie). Enfin, il aborde les innovations post-récolte, les adaptations des procédés de transformation et la diversification des chaînes d'approvisionnement pour renforcer la durabilité économique et environnementale.

Cette revue thématique, sans prétendre à l'exhaustivité, s'appuie principalement sur les résultats et pratiques testés dans le cadre des groupes opérationnels CLIMED-FRUIT, ainsi que sur d'autres projets européens et initiatives nationales ou régionales. Elle fournit des pistes concrètes à destination des agriculteurs, des décideurs et des chercheurs. En adoptant ces pratiques, l'agriculture méditerranéenne peut mieux s'adapter au changement climatique, réduire son empreinte écologique et garantir sa productivité à long terme. L'objectif est d'encourager une transition vers des systèmes agricoles durables et résilients, conciliant santé des écosystèmes et viabilité économique, afin de préserver le patrimoine agricole de la région pour les générations futures.

CHAPITRE 1:
CONSERVATION DES SOLS ET STOCKAGE DU CARBONE

Les sols sont une composante essentielle de l'adaptation et de l'atténuation du changement climatique, en particulier dans les régions méditerranéennes où la dégradation des terres, l'érosion et la perte de fertilité sont aggravées par la hausse des températures et l'irrégularité des précipitations. Au-delà de leur rôle dans la croissance des plantes, les sols assurent des services écosystémiques indispensables tels que la rétention de l'eau, le recyclage des nutriments et le stockage du carbone. Comme le reconnaissent des initiatives européennes et internationales telles que « 4 pour 1000 » et la Mission européenne « Un pacte pour des sols en bonne santé », la restauration et la préservation de sols sains sont fondamentales pour des systèmes agricoles durables.

Ce chapitre présente un ensemble de pratiques de gestion des sols, dont certaines ont été sélectionnées dans le cadre du projet CLIMED-FRUIT, contribuant à la lutte contre l'érosion, à l'amélioration du statut organique et au stockage de carbone dans les systèmes de cultures pérennes méditerranéens.

Amendements organiques : coup de projecteur sur quelques bonnes pratiques

L'objectif principal de l'application d'un amendement organique aux sols agricoles est d'améliorer la teneur en matière organique. L'ajout de matière organique vise à atteindre plusieurs objectifs, notamment le maintien ou l'amélioration des stocks de carbone et des propriétés du sol, ainsi que la satisfaction partielle des besoins en éléments nutritifs de la plante. L'effet de l'application d'amendements organiques dépend principalement des conditions environnementales qui régulent l'activité microbienne ainsi que des pratiques et de la gestion agricoles, par exemple le type d'amendement, le dosage, la fréquence et la forme d'application, etc.

Pratiques basées sur l'utilisation de compost

En tant qu'amendement à libération lente, le compost peut favoriser la résilience des écosystèmes en améliorant la santé des sols, la dynamique du carbone et la productivité de la biomasse et en augmentant la résistance à la sécheresse. Le compost est obtenu par un processus aérobie de dégradation de la biomasse par des micro-organismes. Le compostage se déroule en trois phases : 1. la préparation du mélange de matières organiques, 2. la fermentation, 3. la maturation et le durcissement.

L'agrocompostage : un moyen d'améliorer la qualité des sols et l'économie locale

Le projet AGROCOMPOST a mené des recherches et des expérimentations sur l'agrocompostage dans la région de Valence (Espagne). Il a facilité la formation et la réalisation d'expériences de collaboration sur place avec les principales parties prenantes, notamment les agriculteurs, les coopératives et les administrations rurales. Ces efforts ont contribué à faire progresser l'économie circulaire et à obtenir des matières organiques de qualité dans les zones rurales de la région. En cinq ans, le projet a été mis en œuvre sur 195 sites pilotes et a permis de développer plus de 420 processus de compostage à partir de différentes matières premières, ce qui a permis de produire 15 400 tonnes de biomasse compostée. En termes d'atténuation du changement climatique, cela représente plus de 2 500 tonnes de carbone séquestrées dans les sols des vignobles et des vergers d'agrumes et d'oliviers de la région.

Compost de l'exploitation

Le recyclage des déchets et résidus organiques par le biais du compostage sur l'exploitation est un moyen durable de produire des engrais pour les exploitations agricoles. Dans ce contexte, le groupe opérationnel OLTREBIO avait pour objectif de réduire les intrants agricoles, de valoriser les déchets agricoles et de transmettre les connaissances sur le processus de compostage à d'autres agriculteurs. La première phase du processus consistait à préparer les tas après avoir broyé et mélangé les matières premières (Fig. 1.), c'est-à-dire les résidus de culture mélangés aux déchets de tonte. Le tas a ensuite été recouvert d'une bâche et l'oxygénation a été assurée par un système d'aération, qui a été activé à intervalles réguliers (dix minutes toutes les deux heures au cours des deux premières semaines). La température a été mesurée en continu à l'aide de deux sondes reliées à un enregistreur de données, tandis que l'humidité a été contrôlée chaque semaine (40 à 70 %). Pour permettre l'homogénéisation et la fermentation des matériaux, le tas a été retourné chaque semaine, deux fois au cours des deux premières semaines, puis une fois avant la fin du processus.

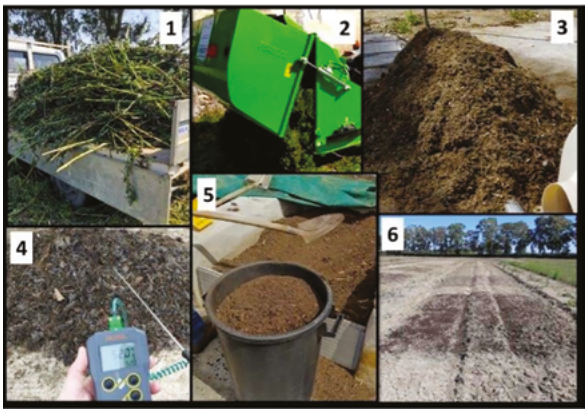


Fig. 1. Compostage sur l'exploitation réalisé par l'exploitation expérimentale CREA-AA : 1. collecte des déchets agricoles ; 2. broyage et mélange ; 3. préparation et oxygénation du tas ; 4. contrôle de la température et de l'humidité ; 5. stockage du compost mûr ; 6. épandage sur place [2]

Le tableau 1 présente les principales caractéristiques du compost obtenu. Les paramètres sont conformes à la législation italienne et mettent en évidence un bon degré de maturité et de qualité du compost. Le compost réalisé a été épandu pendant trois ans comme engrais dans des cultures de raisin de table en agriculture biologique (variétés Sofia et Crimson Seedless) à raison de 2,1 tonnes/ha. Ces épandages ont permis à l'exploitation de maintenir la qualité des raisins de table et de réduire les intrants et le carburant utilisés par l'exploitation de 70 % et 10 %, respectivement.

TABLEAU 1. CARACTÉRISATION DU COMPOST DU GROUPE OPÉRATIONNEL OLTREBIO [2]

Paramètres	Valeur
Matière sèche (%)	76.2
pH	8.09
Carbone organique total (%)	20.85
Azote total (%)	2.43
Rapport carbone/azote (C/N)	8.58

Thé de compost de l'exploitation

Pour améliorer les performances de la production biologique, le groupe opérationnel OLTREBIO a testé l'effet du thé de compost (TC) dans un verger de cerisiers (variété Lapins) et dans deux vignobles de raisins de table (variétés Sophia Seedless et Crimson Seedless). Le TC a été obtenu par extraction aqueuse du compost de l'exploitation qui a été placé dans un tamis à mailles serrées et immergé dans un bio-extracteur de fabrication artisanale, puis incubé pendant cinq jours (Fig. 2.)[2]. L'extraction a été réalisée dans un rapport de 1/5 v/v (20 %) et l'oxygénation a été obtenue en actionnant une pompe pendant 15 minutes toutes les trois heures [3]. Le tableau 2 présente les principales caractéristiques du TC obtenu. Les valeurs de pH sont à peu près neutres, tandis que la conductivité électrique (CE) est supérieure à 1,5 mS/cm, indiquant une dilution supplémentaire (1/15 v/v) [2].

TABLEAU 2. CARACTÉRISATION DU THÉ DE COMPOST DU GROUPE OPÉRATIONNEL OLTREBIO: [2]

Paramètres	pH	EC (mS/cm²)	Azote (mg/L)
Eau	7.2	0.45	
Thé de compost (1/5 v/v)	7.4	1.72	56.7

Le TC a été appliqué dans un verger de cerisiers biologiques par traitement au sol (3 l/arbre) et par traitement foliaire (250 ml/arbre) aux stades « bourgeon rose », post-fructification et véraison. Dans les vignobles biologiques de raisin de table, il a été appliqué au sol à la dose de 1,5 l/pied à une longueur de pousse d'environ 15 cm et aux stades de la nouaison et de la véraison. [3].

L'application foliaire de TC a favorisé l'activité photosynthétique de la culture, agissant comme un biostimulant plutôt que comme un amendement. Par ailleurs, l'application de compost et de thé de compost a augmenté de manière significative la teneur en sucre des fruits dans les raisins de table, variété Sophia Seedless (17,40° Brix), et les cerises, variété Lapins (22,81° Brix), par rapport au témoin (15,67 et 20,63° Brix, respectivement) et a contribué à améliorer l'état hydrique des plantes par rapport au témoin dans des conditions de stress hydrique sévère (< -1,5 MPa). Le même effet de l'application foliaire de TC sur les vignes a été observé en Égypte, avec une amélioration de la teneur en sucre des fruits et des anthocyanes [4].



Fig. 2. Production de thé de compost sur l'exploitation expérimentale CREA-AA : 1. préparation du sac avec le compost à extraire ; 2. extraction aqueuse ; 3. contrôle de la conductivité électrique et du pH ; 4. dilution ; 5. application foliaire dans le verger de cerisiers ; 6. application au sol dans le vignoble [2]

L'utilisation de compost de déchets verts

Une expérimentation sur trois ans a été menée en France pour évaluer l'impact du compost de déchets verts (un mois de compostage) appliqué à un sol de limon argileux-sableux sous les rangs de vigne. Après l'application annuelle d'environ 126 t/ha-1 de déchets verts sur une période de trois ans, la teneur en matière organique s'est améliorée de 1,6 % à 4,3 % dans l'horizon 0-20 cm. D'autres paramètres tels que le rapport C/N, la biomasse microbienne et le pH se sont également améliorés. De plus, le traitement des déchets verts a augmenté de manière significative le nombre de vers de terre collectés, avec la présence de plusieurs catégories écologiques de vers de terre, par rapport au témoin (sans amendement).

Le projet OAD MO a également montré que le compost de déchets verts améliorait significativement le pH du sol, passant de 6,3 dans le témoin à 6,6 et 6,9 dans le cas du compost de déchets verts et du compost commercial, respectivement.

Le lombricompost : une coopération directe avec les vers de terre

Le lombricompost est constitué des déjections d'espèces spécifiques de vers de terre qui peuvent améliorer la santé du sol et l'état des nutriments. Les déjections des vers de terre (lombricompost) constituent un engrais organique nutritif riche en humus, en NPK, en micronutriments et en microbes bénéfiques du sol, ainsi qu'en bactéries fixatrices d'azote et solubilisatrices de phosphate, en actinomycètes et en hormones de croissance telles que les auxines, les gibbérellines et les cytokinines. Le lombricompost et son extrait liquide (engrais liquide du lombricompost) sont tous deux des stimulateurs de croissance et des protecteurs des plantes cultivées [5].

Le lombricompost améliore la croissance et le rendement des cultures, tout en augmentant la diversité et l'activité des microbes antagonistes et des nématodes, ce qui contribue à supprimer les ravageurs et les maladies causées par les phytopathogènes présents dans le sol [6].

SOLUTION DISPONIBLE SUR LE MARCHÉ[1]

Veraterra est le biostimulant de préparation du sol de VERAGROW. Il s'agit d'une formulation complexe à base de lombricompost, complétée par des extraits d'algues, dont l'action est multiple :

- Stimule la flore microbienne, avec une augmentation de l'activité enzymatique dans la dégradation de la matière organique et une augmentation significative des associations symbiotiques stimulant les cultures..
- Améliore la qualité physico-chimique du sol, avec une meilleure capacité de stockage des nutriments, réduisant la perte d'eau et le risque d'acidification ou d'alcalinisation du sol grâce à son action tampon.
- Améliore la biodisponibilité des nutriments.



Fig. 3. Processus de fabrication du biostimulant Veraterra (Veragrow): 1) sélection des matières premières actives, 2) production d'un lombricompost riche et stable, 3) extraction des principes actifs et enrichissement de la solution, 4) conditionnement dans un format pratique

1. Veraterra est l'une des technologies/l'un des produits primés lors du Crowd-Writing Contest organisé par Climed-Fruit en 2023, destiné aux entreprises privées, afin de sensibiliser les agriculteurs traditionnels aux innovations les plus récentes qui favorisent la résilience face au changement climatique. Voir toutes les technologies primées ici.

Paillage

Le paillis est principalement utilisé pour lutter contre les mauvaises herbes ou pour maintenir l'humidité du sol (pour de plus amples détails, voir les sous-thèmes 2 et 3). Fabriqué à partir de différents types de matériaux naturels, il a également pour effet secondaire d'améliorer la santé du sol lorsque celui-ci se détériore.

L'effet du paillage de paille de riz sur les paramètres de santé du sol, y compris le carbone organique du sol, a été évalué dans deux plantations d'agrumes sur la plaine côtière de Valence en Espagne ; ces plantations représentent ensemble le climat méditerranéen semi-aride à été chaud sur des terres planes [7]. Le paillis a permis de réduire la température du sol et de multiplier par quatre la croissance des racines ainsi que le développement de la macrofaune du sol. Sous le paillis de riz, la macroporosité est entre 2 et 14 fois plus élevée, et la fraction massique de carbone organique du sol a augmenté de 10 % par rapport au sol nu. Toutefois, les effets bénéfiques du paillage sur la santé du sol sont limités après trois ans de traitement. Il est recommandé d'ajouter des engrais et/ou des amendements organiques parallèlement à une opération de travail du sol en surface [7]. Il a été démontré que l'utilisation d'un paillis de paille autour de cultures pérennes fraîchement plantées améliorait la croissance des plantes, réduisait la mortalité et augmentait la vitesse de récupération [8]. En 2023, des pommiers greffés non irrigués ont été plantés dans le cadre d'un essai en France et deux modalités ont été mises en œuvre : l'une avec paillage et l'autre avec binage et fertilisation avec 60 unités d'azote par an. Au moment de la repousse, la parcelle paillée présentait un taux de mortalité de 12 %, tandis que la parcelle binée et fertilisée présentait un taux de mortalité de 20 %. La croissance du greffon a été mesurée à la fin du mois d'août. La longueur des pousses du groupe témoin était de 18 cm en moyenne, alors que celle du groupe paillé, non fertilisé, était de 27,5 cm en moyenne. Cette augmentation de croissance est souvent observée, notamment dans des conditions de sol bien drainé ou pauvre [8]).

Le projet VITIMULCH a testé différents types de paillis sous les rangs de vigne dans le sud de la France pendant trois ans, entre 2020 et 2023. Différents matériaux ont été utilisés sous les rangs : coquilles d'huîtres broyées, écorces de bois, copeaux de bois, déchets verts compostés, sarments de vigne, feutre à base fibres végétales, etc., comme le montre la figure 4. Chaque type de paillis a été mis en place à une hauteur d'environ 15 à 20 cm et sur une largeur de 60 cm.



Fig. 4. Différents types de paillis sous le rang au moment de leur mise en place dans le cadre du projet VITIMULCH , à Gaillac, en France

Les différents paillis ont amélioré les attributs physiques et chimiques du sol et augmenté les niveaux d'humidité du sol (voir sous-thème 3). Par exemple, l'application pendant trois ans de copeaux de bois sous les rangs a amélioré la matière organique du sol de 1,8 % à 2,5 % et a eu un effet positif sur le nombre de vers de terre par rapport aux rangs désherbés chimiquement. Les premiers résultats illustrés dans la figure 5 montrent l'impact de différents types de paillis sur l'abondance des vers de terre du sol après leur détérioration.

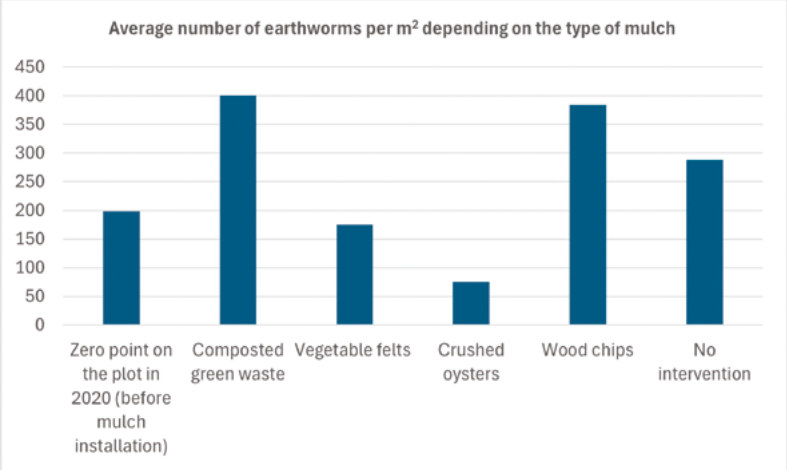


Fig. 5. Abondance des vers de terre (nombre moyen par m²) en fonction du type de paillis. De gauche à droite : point zéro de la parcelle en 2020 (avant la mise en place du paillis), déchets verts compostés, feutres végétaux, huîtres broyées, copeaux de bois, aucune intervention – projet VITIMULCH

Résidus et sous-produits de culture

Utilisation des résidus d'élagage

Les producteurs d'agrumes avaient l'habitude de brûler les résidus de taille, mais cette pratique est désormais limitée, car elle présente des risques pour l'environnement et pour la santé humaine, et contribue aux émissions de CO_2 dans l'atmosphère. Il est recommandé de laisser au sol les bois de taille des agrumes de manière à ce qu'ils couvrent au moins 30 % de la surface du sol entre les rangées. En plaçant ces résidus à la surface du sol (50 % pour les arbres fruitiers tels que les oliviers ou les amandiers), on crée une couche protectrice qui réduit l'érosion et maintient l'humidité du sol en réduisant l'évaporation de l'eau. Par ailleurs, on constate une augmentation de la matière organique du sol et du carbone généré par le sol. Ces résidus constituent également un refuge pour la faune. Le projet « Amélioration du sol et de la plante à partir des bois de taille » a montré à juste titre que l'application de bois de taille d'agrumes broyés, enrichis de graminées et de légumineuses cultivées comme couverts végétaux, doublait l'activité biologique du sol par rapport au témoin, favorisait le stockage de l'eau dans le sol et augmentait le stockage du carbone organique dans le sol. Cette expérimentation illustre l'impact positif de la réutilisation des bois de taille dans les cultures plutôt que de les enlever ou de les brûler.

Le groupe opérationnel Carbocert a en outre évalué les avantages de l'intégration des bois de taille dans les vignobles et les vergers d'agrumes, d'oliviers et d'amandiers en les épandant à la surface du sol dans l'inter-rang. Pour que cette opération soit effectuée correctement, les résidus doivent être hachés ou déchiquetés avant d'être épandus (Fig. 6.).



Fig. 6. Gestion des couvertures de résidus de taille dans une culture d'agrumes (photo: LIFE Low Carbon Feed) et broyage avant épandage dans l'allée

Les résidus hachés ou déchiquetés doivent être suffisamment petits pour éviter la formation de mottes dans lesquelles les parasites peuvent se nicher, pour ne pas gêner d'autres opérations dans le verger/vignoble (traitements, semis, etc.) et pour faciliter leur décomposition. La décomposition lente permet d'introduire le carbone de manière progressive et sur une longue période, ce qui peut augmenter de 60 % la teneur en carbone organique des couches superficielles du sol. Lorsque ces pratiques sont associées au paillage, cette augmentation atteint 73 % (résultats pour la viticulture). Dans les plantations fruitières, le groupe opérationnel Carbocert a évalué un potentiel de séquestration du carbone proche de 1,5 t/ha-1 et par an-1.

Recyclage des sous-produits agricoles

Réutilisation des coques et des écales d'amandes

Le recyclage des coques et des écales d'amandes (Fig. 7) en tant qu'amendements organiques dans les vergers améliore la biomasse et l'activité microbienne du sol, ce qui favorise la santé du sol, le cycle des éléments nutritifs et le stockage du carbone. Les résultats d'un essai sur le terrain mené en Californie sur un sol limoneux irrigué ont montré que les amendements à base de coques et d'écales appliqués en surface augmentaient de manière significative la biomasse microbienne avec des bactéries et des champignons par rapport au témoin [9]. Cette couche organique favorise la diversité des communautés microbiennes et améliore la multifonctionnalité du sol et l'activité microbienne. Les amendements se sont décomposés de 45 % en l'espace d'un an, abaissant le rapport C/N de l'amendement de 53/1 à 29/1, sans impact négatif sur l'état nutritionnel des arbres ou sur les rendements. En outre, la densité de la biomasse racinaire des amandiers a doublé dans les sols amendés, ce qui met en évidence le rôle de la couche organique dans la stimulation de la croissance des racines et l'amélioration des conditions du sol.



Fig. 7. Photos des traitements de coques et d'écales d'une tonne par acre (en haut) et d'écales d'une tonne par acre (en bas) dans un site du comté de Merced en 2017, pendant les mois de mars (à gauche), d'avril (au milieu) et de juillet (à droite). Source: [10]

Récupération des effluents: un exemple en viticulture

Le projet WETWINE a développé une technologie de récupération des déchets vinicoles qui offre une alternative au traitement des boues avec de faibles coûts d'installation et des besoins énergétiques minimes. Les eaux usées du chai sont traitées par un système de méthanisation et de filtre de roseaux (filtre SSSCW). La partie solide est envoyée dans un bassin artificiel pour le traitement des boues soumises à une stabilisation anaérobie, les boues pouvant être recyclées en tant qu'amendement organique pour les vignobles dans le cadre de l'économie circulaire. La composition des boues produites est très variable et dépend des conditions agro-climatiques locales ainsi que de l'origine des boues. La technologie a démontré que les boues viticoles sont inoffensives et peuvent être incorporées dans les vignobles de manière simple, économique et écologique. Cependant, leur impact sur la qualité du sol est moins marqué que celui des amendements commerciaux, qui contiennent davantage d'éléments nutritifs. Des études complémentaires et une installation grandeur nature sont nécessaires avant de pouvoir réaliser des essais à plus grande échelle.

Biochar

Le biochar, substance à base de carbone issu de la pyrolyse de déchets organiques, est un produit prometteur pour l'augmentation de la teneur en carbone dans les zones méditerranéennes. Le biochar a été ajouté au règlement de l'UE sur les engrais [11] et est autorisé dans la production agricole biologique [12]. En Espagne, l'application de 100 t/ha-1 (20 t/ha-1 et par an-1) de biochar a augmenté le carbone organique total (COT) de 10 à 30 g/Kg-1, et dans une autre expérimentation, le COT a doublé après l'application de 60 t/ha-1 de biochar pendant deux ans. En Italie, après deux ans d'application de biochar dans des parcelles viticoles, ont été constatés une augmentation de la teneur en eau disponible dans le sol (3,2 %/45 % pour les taux d'application de 16,5/33 t/ha-1, respectivement) et du potentiel hydrique des feuilles (24 à 37 %) pendant les sécheresses. En outre, le rendement en raisins par plant a augmenté de manière significative pendant quatre ans après la première application de biochar, avec une variation allant de 16 % à 60 %. L'effet du biochar sur le rendement s'est avéré plus important les années où les précipitations étaient les plus faibles, ce qui suggère un effet protecteur du biochar contre le stress hydrique des plantes [13]

Comparaison de différents amendements pour le stockage du carbone dans le sol

Le projet OAD MO a mené des expérimentations pendant huit ans sur l'application de matières organiques dans les sols viticoles, y compris le compost de déchets verts, le compost commercial, le compost de marc de raisin et les couverts végétaux. Les résultats montrent que les amendements organiques améliorent la teneur en carbone du sol et la teneur en matière organique, bien que les différences significatives entre les différents types de matière organique testés soient rares, en raison de l'évolution lente des niveaux de carbone du sol et de l'hétérogénéité de la distribution du carbone.

Les amendements organiques apportent également des éléments minéraux tels que l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium et le magnésium, qui sont disponibles pour les vignes à moyen et long terme. Les données ont été utilisées pour paramétrer et valider pour la viticulture le modèle AMG, qui calcule l'évolution du stock de carbone organique sur le long terme. Un prototype a été développé pour fournir un outil d'aide à la décision aux viticulteurs. Des simulations de l'évolution du stock de carbone ont été réalisées pour différents scénarios de pratiques culturales, à partir d'une situation initiale, et ceci sur les différents vignobles et pour différentes situations de sols. Trois scénarios ont été analysés pour l'étude de cas d'un vignoble languedocien caractérisé par un sol alluvial caillouteux typique des Costières de Nîmes :

- Scénario de référence : désherbage mécanique de tous les inter-rangs et apport de compost de déchets verts (25 tonnes tous les quatre ans, 36 % MO, ISMO 60).
- Scénario 1 : enherbement temporaire sur tous les inter-rangs, apport de 25 tonnes de compost de déchets verts tous les 4 ans (36 % MO, ISMO 65) et résidus de taille laissés au sol
- Scénario 2 : désherbage mécanique et broyage des résidus de taille
- Scénario 3 : résidus de taille et enherbement temporaire dans tous les inter-rangs

Cette simulation a montré que le carbone du sol fourni par l'amendement organique (compost de déchets verts) est beaucoup plus élevé que celui fourni par l'enherbement (environ cinq fois plus élevé) (Fig. 8). Le modèle AMG a prédit une augmentation du stock de carbone du sol de 2 t/ha-1 après environ 15 ans d'enherbement temporaire. Par ailleurs, l'application d'amendements organiques pourrait augmenter de manière significative le stock de carbone du sol de 10 et 15 t de C/ha d'ici 2050.

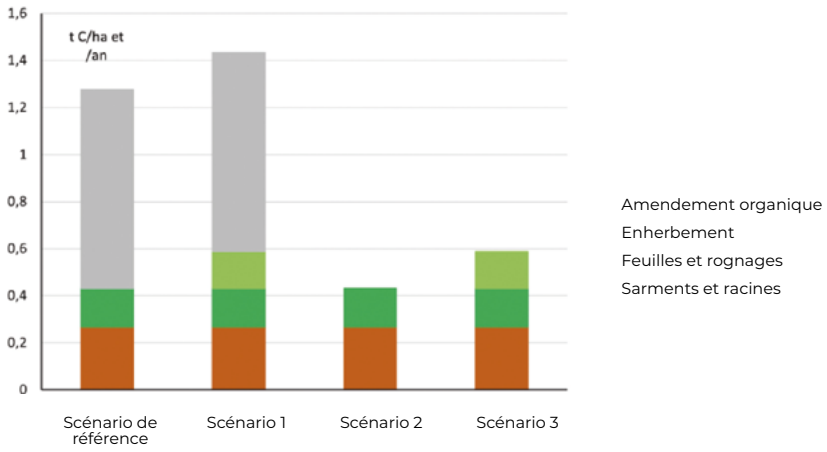


Fig. 8. Résultats de la simulation utilisant l'OAD MO dans l'étude de cas du vignoble languedocien [14]

ENHERBEMENT ET RÉDUCTION DU TRAVAIL DU SOL POUR LES CULTURES PÉRENNES AFIN D'AMÉLIORER LA QUALITÉ DU SOL

Pour augmenter la séquestration du carbone organique du sol (SOC) dans la région méditerranéenne, il convient de sélectionner et de gérer les couverts végétaux dans les cultures pérennes en tenant compte de facteurs tels que la fertilité du sol, la composition de la communauté végétale, la méthode de destruction, la gestion des résidus et le processus de perturbation du sol. En outre, le potentiel des couverts végétaux dépend du climat, de la gestion et de l'évolution de la communauté microbienne.

Enherbement

Gestion du couvert permanent spontané dans les vergers d'amandiers

L'objectif de l'enherbement permanent est de maintenir et d'entretenir le couvert végétal entre les rangs, qu'il soit spontané ou semé. Le groupe opérationnel CARBOCERT a examiné la mise en œuvre de cette pratique dans des vergers d'amandiers (Espagne) afin d'évaluer son impact sur le sol et de fournir des conseils techniques. La pratique la plus efficace pour séquestrer le carbone dans le sol est un couvert spontané, avec comme recommandation de recourir principalement à des outils de coupe (tondeuses, coupe-bordures, débroussailleuses) ou à un travail du sol très superficiel pour l'entretenir et de toujours laisser les résidus végétaux à la surface. Ces mêmes types de gestion sont recommandés pour le désherbage dans le rang et pourraient être associés, pour plus d'efficacité, à un paillage, obtenu soit par la tonte du couvert lui-même (Fig. 9), soit par des apports extérieurs (en privilégiant le paillage naturel et local). Les moutons ou les chèvres peuvent également être utilisés pour le contrôle du couvert végétal dans toutes les cultures pérennes (comme le montre la Fig. 9), avec pour avantage d'apporter également de la matière organique supplémentaire au sol. Le pâturage n'est conseillé que pendant la période de dormance hivernale, car les animaux broutent également les branches inférieures et les jeunes pousses.



Fig. 9. Couvert spontané entretenu par fauche dans un verger d'amandiers (à gauche) et par des moutons utilisés pour le contrôle du couvert végétal dans une oliveraie - groupe opérationnel CARBOCERT

Pour limiter la concurrence hydrique et nutritionnelle, les couverts les plus efficaces sont ceux dont le cycle végétatif est opposé à celui de l'amandier. Ces couverts doivent être en place entre la période de sénescence de l'amandier et la période d'initiation florale et doivent se dessécher naturellement à partir de la période de différenciation florale jusqu'à la période post-récolte si cela est possible. Afin d'assurer la composition la plus favorable du couvert spontané, le fauchage peut être planifié de manière à favoriser le réensemencement naturel des espèces souhaitées et à empêcher la floraison des espèces indésirables.

Enherbement sous le rang

La mise en place d'un enherbement naturel est un processus simple, tandis que l'utilisation d'un enherbement semé ou d'un gazon peut maîtriser plus efficacement la concurrence pour l'eau et les nutriments grâce à la sélection d'espèces, de variétés ou de mélanges appropriés. Une expérimentation menée sur la vigne par l'IFV (GO 0 herbicides) a démontré que les premières années, les mélanges à base d'espèces du genre Koeleria sont ceux qui ont le moins d'impact sur la vigueur de la vigne. Quant à l'enherbement naturel, son impact sur les vignes a eu tendance à augmenter au fil des années, parallèlement à son taux de couverture sous le rang. L'introduction de légumineuses est une des solutions actuellement testées pour gérer la concurrence azotée.

Le groupe opérationnel IOCONCIV a étudié l'utilisation d'un couvert végétal qui se réensemence de lui-même sous un rang de vigne en Toscane, en Italie. Le couvert permanent a été semé sous le rang avec Trifolium subterraneum ssp. brachycalicinum , qui présente une capacité d'auto-ensemencement, permettant d'enchainer différents cycles pendant 3 à 4 ans. La sous-espèce brachycalicinum a évolué pour résister aux sols secs et est mieux adaptée aux sols argilo-limoneux subalcalins. La biomasse du trèfle sert de paillis vivant en automne, en hiver et au printemps, et se transforme en paillis mort en été, ce qui a pour effet de réduire la concurrence avec les vignes pour l'eau et les nutriments et de réduire le stress dû à la sécheresse en raison de la couverture du sol pendant l'été. À la fin de l'été, la germination spontanée des graines de trèfle entame un nouveau cycle biologique sous les rangs, offrant des avantages tels que la suppression de la levée des adventices et l'amélioration de la fertilité du sol.

Engrais vert et culture intercalaire

L'engrais vert est un couvert végétal qui produit de la biomasse et qui est restitué au sol pour en améliorer la fertilité et la structure, à condition que la concurrence de l'eau et des nutriments soit maîtrisée. Ce n'est pas facile, mais cela peut présenter un réel intérêt dans le contexte des sols méditerranéens pauvres. La date, le type de destruction et le choix des espèces sont des facteurs importants pour la bonne mise en œuvre de cette pratique. L'engrais vert peut avoir un impact sur l'apport d'azote aux cultures, limitant ainsi l'utilisation d'intrants [15].

La culture intercalaire consiste à faire pousser deux ou plusieurs cultures à proximité l'une de l'autre. L'objectif final de la culture intercalaire est d'augmenter le rendement par hectare et par unité, ce qui est possible grâce à une meilleure utilisation des ressources du sol qui auraient été utilisées par une seule culture. L'agriculteur peut choisir les cultures qu'il souhaite récolter, soit toutes, soit quelques-unes, soit aucune.

Exemple de mise en place d'engrais verts dans un vignoble méditerranéen

Au cours d'une expérimentation menée dans un vignoble en France (IFV Sud-ouest), on a pu observer qu'environ 62 % du carbone de la biomasse d'engrais vert détruit était minéralisé, tandis que le reste était classé comme carbone « stable », comme l'indique l'indice de stabilité de la matière organique (ISMO) [16]. L'ISMO est une mesure du potentiel du produit à stocker le carbone dans le sol, exprimé en pourcentage de la matière organique du produit. Plus la valeur de l'ISMO est proche de 100 %, plus le carbone fourni par l'engrais vert restera dans le sol pendant une longue période. Des calculs ont été effectués pour déterminer la capacité théorique de stockage de carbone des engrais verts. Par exemple, un engrais vert de 4 tonnes de matière sèche/ha^{-1} (semé dans tous les inter-rangs) représente 1 600 kg de C/ha^{-1}, soit 608 kg de carbone stable par ha (ISMO 38 %). Dans le cas de l'engrais vert semé en rangs alternés, le potentiel de stockage de carbone est de 200 kg/ha, soit 50 kg de C/t de matière sèche. Ce stockage de carbone varie peu en fonction des espèces d'engrais verts utilisées car elles ont toutes le même indice de stabilité de la matière organique [16].

Dans le contexte méditerranéen, il convient de semer l'engrais vert le plus tôt possible (fin août/début septembre) afin que les jeunes plants soient bien développés au moment des fortes pluies d'automne, et ce pour réduire l'érosion et éviter que les feuilles de vigne ne soient emportées par le vent (elles constituent une source de nutriments pour le sol). En conditions méditerranéennes, il est également conseillé de prévoir un surplus de plants (toutes espèces confondues) et de choisir un mélange bien diversifié (légumineuses, graminées, brassicacées) afin d'assurer la pérennité du couvert avec une rotation des espèces dominantes.

Le choix de la méthode de destruction dépend des objectifs visés. Le broyage ou le fauchage au printemps détruit les parties aériennes et leur permet de se dessécher. Le fauchage ou le roulage peuvent être utiles pour pailler et entretenir le sol sans désherbage chimique ni travail du sol. Dans un contexte méditerranéen, il est conseillé de détruire le couvert végétal au début du printemps pour éviter une trop forte concurrence hydrique, qui aurait également un impact sur la minéralisation du couvert végétal une fois celui-ci détruit.

Atteindre les objectifs de l'initiative 4 ‰ dans les oliveraies grâce aux cultures intercalaires

Le projet DIVERFARMING a mis en œuvre une étude sur trois ans dans un verger d'oliviers traditionnels dans le sud de l'Espagne, avec des cultures en rang et un travail minimum du sol, comparé à un travail

conventionnel, en se concentrant sur le carbone organique du sol et la qualité du sol. Trois stratégies de cultures intercalaires - *Crocus sativus* (D-S), *Vicia sativa* et *Avena sativa* en rotation (D-O), et *Lavandula x intermedia* (D-L) - ont été testées par rapport au témoin avec travail du sol conventionnel. Les cultures intercalaires ont augmenté la teneur organique du sol dans la couche arable (0-10 cm) de 41,1% (D-S), 28,5% (D-O) et 30,5% (D-L). Aucune différence significative n'a été observée dans les indices de qualité du sol, mais les cultures intercalaires ont atteint les objectifs de l'initiative 4‰, avec une augmentation annuelle du carbone du sol par hectare et par an de 80% (D-S), 87,4% (D-O) et 86,4% (D-L). Cela met en évidence le potentiel des cultures intercalaires pour améliorer le stockage du carbone et la durabilité des sols à court terme [17].

Comparaison des couverts végétaux et de leurs effets sur le sol dans les vergers de cerisiers et d'amandiers

Les effets de différents types de couverts végétaux, du travail mécanique du sol et des traitements herbicides sur la teneur en matière organique et les propriétés physiques du sol ont été étudiés dans un verger de cerisiers au sol argileux situé dans la région nord de la Turquie, pendant deux ans [18].

Trifolium repens L. (TR), *Festuca rubra subsp. Rubra* (FRR), *Festuca arundinacea* (FA), *T. repens* (40%) + *F. rubra rubra* (30%) + mélange de *F. arundinacea* (30%) (TFF), *Vicia villosa* (VV) et *Trifolium meneghinianum* (TM) ont été utilisés comme couverts végétaux. Les couverts végétaux ont été fauchés pendant la période de floraison. 90 jours après la récolte des graines, des échantillons de terre ont été prélevés à deux profondeurs (0-20 cm et 20-40 cm) dans chaque parcelle. Les traitements par TR et VV ont augmenté la teneur en matière organique du sol à une profondeur de 0-20 cm par rapport aux parcelles témoins non traitées (Fig. 10) [18].

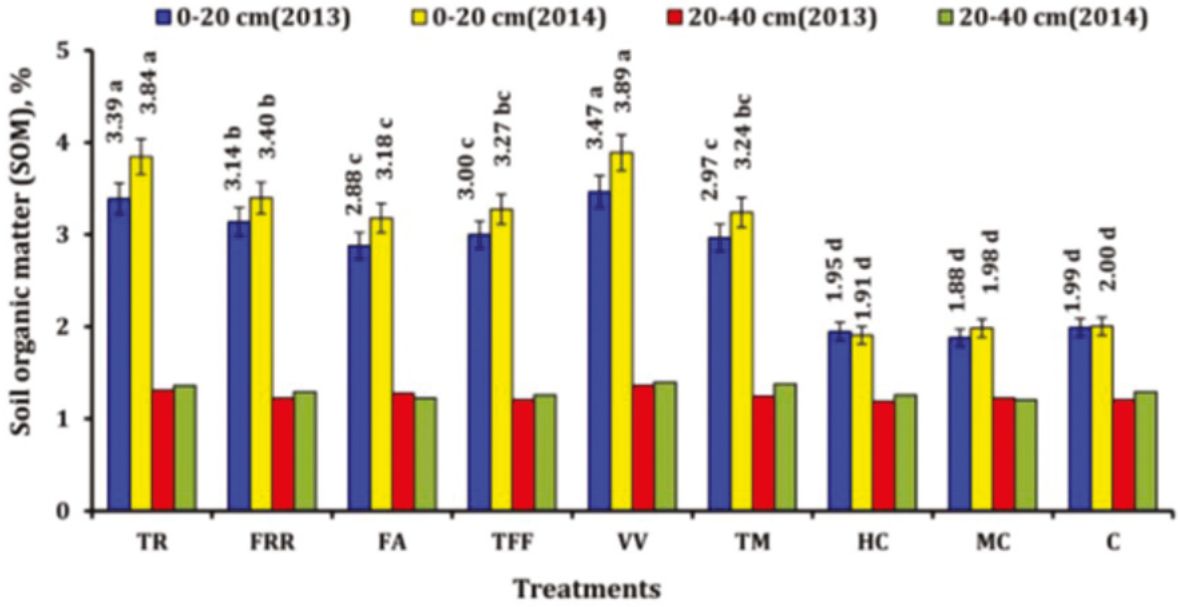


Fig. 10. Effets des couverts végétaux et d'autres traitements sur la matière organique du sol (SOM) à 0-20 cm et 20-40 cm de profondeur dans un verger de cerisiers au sol argileux. Trifolium repens L. (TR), Festuca rubra rubra L. (FRR), Festuca arundinacea (FA), T. repens (40%) + F. rubra rubra (30%) + F. Arundinacea (30%) (TFF), Vicia villosa (VV), Trifolium meneghinianum (TM), une parcelle cultivée mécaniquement (MC), un traitement herbicide (HC) et une parcelle témoin (C) [18]

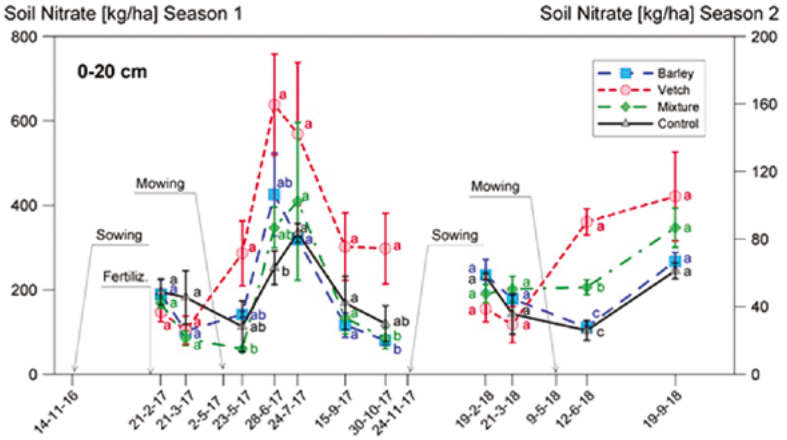


Fig. 11. Teneur en nitrates du sol à une profondeur de 0-20 cm au cours des deux saisons de surveillance. Orge (carré bleu), vesce (cercle rouge), mélange (losange vert), témoin (triangle noir) [19]

Une expérimentation sur le terrain a également été menée à Cordoue, en Espagne, sur des amandiers de la variété Guara âgés de 10 ans et irrigués au goutte-à-goutte pendant deux saisons, afin d'étudier le potentiel de séquestration de l'azote et du carbone dans le sol de trois couverts végétaux semés (orge, vesce velue et mélange de 65 % d'orge et de 35 % de vesce) et le contrôle de la flore spontanée. En ce qui concerne la fertilité du sol en termes de nitrates, les meilleurs résultats ont été observés pour la vesce (Fig. 11), avec une teneur en nitrates du sol améliorée de plus de 35 %, tandis que le mélange et les couverts d'orge ont eu un potentiel de séquestration du carbone plus élevé, augmentant le carbone organique du sol de plus de 1,0 Mg/ha-1 au cours de la période d'étude (Fig. 12) [19].

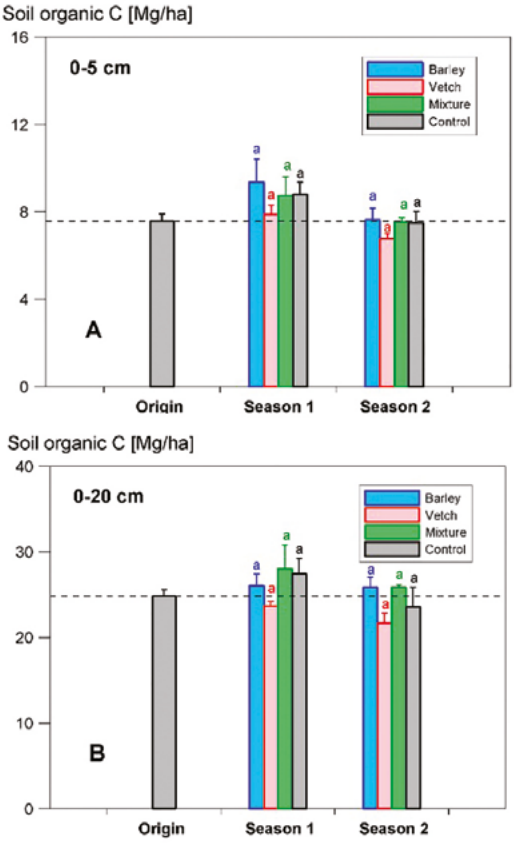


Fig. 12. Carbone organique du sol au début et à la fin de l'expérimentation pendant la période d'étude à 0-5 cm (A) et à 0-20 cm de profondeur (B) [19]

Pratiques de conservation des sols (Techniques culturales simplifiées TCS)

Les techniques culturales simplifiées désignent un ensemble de pratiques de gestion du sol visant à réduire la perturbation de ce dernier, à maintenir la matière organique et à réduire au minimum l'érosion tout en améliorant l'infiltration et la rétention d'eau (B). Les TCS vont de pair avec les pratiques de couverture du sol mentionnées ci-dessus. Les pratiques de conservation des sols peuvent se résumer en trois principes clés :

- Perturbation minimale du sol : limiter la fréquence et la profondeur du labour pour éviter de perturber la structure du sol et l'activité microbienne.
- Couverture du sol : maintenir le sol couvert de résidus de culture, de couverts végétaux ou de végétation naturelle pour prévenir l'érosion et retenir l'humidité.
- Rotations des cultures ou couverts végétaux : renforce la biodiversité, améliore le cycle des nutriments et réduit les pressions exercées par les parasites et les maladies.

Le labour a une incidence sur les communautés bactériennes du sol en réduisant la matière organique du sol en tant que source de carbone et de nutriments, en modifiant l'humidité et la température du sol et en diminuant la proportion de macroagrégats stables, qui constituent un micro-habitat accueillant pour les bactéries [20]. Des études antérieures ont montré que la réduction du labour augmente de manière significative la teneur en matière organique du sol à une profondeur de 0-10/30 cm par rapport au labour conventionnel, indépendamment des conditions climatiques, du type de sol et du système de culture [21].

Plus le travail du sol est intensif, plus le sol est pauvre. Le projet GASCOGN'INNOV a démontré que la réduction de l'intensité du travail du sol et l'augmentation de la durée de la couverture végétale peuvent améliorer l'abondance de tous les organismes étudiés (vers de terre, nématodes, bactéries et champignons), mais pas nécessairement leur diversité.

AGROFORESTERIE ET HAIES POUR LE STOCKAGE DU CARBONE ET LA CONSERVATION DES SOLS

Les arbres et les haies jouent un rôle crucial dans la fertilité des sols et le stockage du carbone, car ils agissent comme des puits de carbone en absorbant le CO_2 atmosphérique par photosynthèse et en le stockant dans leur biomasse (bois, racines, feuilles) et dans le sol par l'intermédiaire des systèmes racinaires et de la matière organique.

Agroforesterie

Les cultures pérennes et les pratiques de gestion telles que l'absence de travail du sol, le paillage des résidus, la rotation prolongée des cultures et les couverts végétaux sont des stratégies qui peuvent contribuer au stock de carbone du sol dans les zones méditerranéennes, contribuant ainsi à la réduction des émissions de GES agricoles. En combinant certaines de ces caractéristiques, les systèmes agroforestiers ont un grand potentiel d'atténuation grâce à la séquestration du carbone. Parmi les systèmes agroforestiers de la péninsule ibérique, en Europe méridionale, le *montado* au Portugal et la *dehesa* en Espagne jouent un rôle particulièrement important. Ils se composent principalement d'arbres à usages multiples tels que les châtaigniers (*Castanea spp.*),

les chênes (*Quercus spp.*) et les oliviers (*Olea europa L.*) avec une végétation de sous-bois telle que des pâturages où les animaux d'élevage (moutons, porcs noirs et bovins) pâturent de manière extensive, généralement dans le cadre d'un système de rotation [22].

Les systèmes agroforestiers méditerranéens ont généralement une faible fertilité du sol et sont limités par la faible profondeur du sol et la faible disponibilité de l'eau et des nutriments, ce qui se traduit par des pâturages naturels dont la productivité et la qualité sont médiocres. Après avoir constaté la faible productivité des pâturages, les agriculteurs de la péninsule ibérique ont commencé à semer des mélanges riches en légumineuses (Fig. 13), ce qui a contribué à une augmentation simultanée de la productivité des prairies et de la concentration de carbone organique dans le sol, tout en empêchant la dégradation des sols [22].



Fig. 13. Vue partielle d'un système agroforestier portugais avec du Quercus sp. et un pâturage biodiversifié [22]

Avec les arbres, les pâturages permanents (naturels ou améliorés) constituent également un moyen rapide d'accumuler du carbone dans le sol, en générant une quantité significativement plus élevée de carbone organique dans la couche de terre de 0 à 10 cm sous la canopée des arbres dans les pâturages espagnols non aménagés (2,4 kg de C/m^{-2}) et améliorés (3,1 kg de C/m^{-2}) par rapport aux champs ouverts (1,8 et 2,1 kg de C/m^{-2} dans les pâturages naturels et améliorés, respectivement) [23].

Haies

Les haies sont souvent le point de rencontre de différents écosystèmes, comme la limite entre les forêts et les terres agricoles. Ces zones se caractérisent souvent par une biodiversité accrue et un taux d'échange de nutriments plus élevé En Méditerranée, les haies situées entre les zones boisées, les maquis et les terres agricoles peuvent servir de zones dynamiques favorisant le cycle des nutriments, la rétention de l'eau, l'accumulation de matière organique et la régulation du vent. Elles ont donc des effets similaires sur la conservation des sols à ceux mentionnés ci-dessus pour l'agroforesterie. Les haies peuvent également réduire le ruissellement et donc la perte de matière organique due à l'érosion du sol. D'après une analyse documentaire [24], les haies contribuent à un stockage supplémentaire de carbone de 750 kg de C/ha^{-1} et par année de haie^{-1}. Toutefois, en règle générale, il est difficile de planter une haie en raison du manque d'espace une fois que le vignoble ou le verger est en place. Dans ce cas, il est conseillé de mettre en place des haies d'arbustes plus petites le long des limites de la parcelle.

Simulation du stockage du carbone par les haies en viticulture

Le stockage de carbone associé à la plantation de haies autour des parcelles de vigne peut être estimé à l'aide d'un calculateur d'empreinte carbone.

Par exemple, à l'échelle d'une exploitation agricole, chaque parcelle de vigne peut être encadrée par des haies mixtes et fragmentée par l'ajout de haies d'arbustes intra-parcellaires. Les haies mixtes sont plus grandes que les haies d'arbustes. Elles contiennent de grands arbres et des arbustes hauts et bas qui forment une strate haute et une strate intermédiaire. Le type de sol et les conditions climatiques déterminent le choix des espèces. L'exemple suivant de simulation a considéré une grande parcelle de 30 hectares, avec 2 600 mètres linéaires de haies mixtes plantées, ce qui correspond à 90 mètres linéaires par hectare. Des haies d'arbustes sont en outre plantées tous les 60 mètres entre les rangs de vigne, ce qui correspond à 150 mètres linéaires de haies intra-parcellaires par hectare. Ainsi, nous avons des haies hautes et volumineuses autour de la parcelle et des haies plus petites entrecoupant les rangs de vigne au sein de la parcelle.

- Stockage de carbone d'une haie mixte positionnée autour de la parcelle, à raison de 90 mètres linéaires par hectare: 280 kg de CO_2 équivalent/ha et /an (calculé à l'aide de l'outil GES&VIT développé par l'IFV)
- Stockage de carbone dans des haies d'arbustes alternant avec des rangs de vignes, pour fragmenter la parcelle, à raison de 150 mètres linéaires par hectare: 330 kg de CO_2 équivalent/ha et /an.

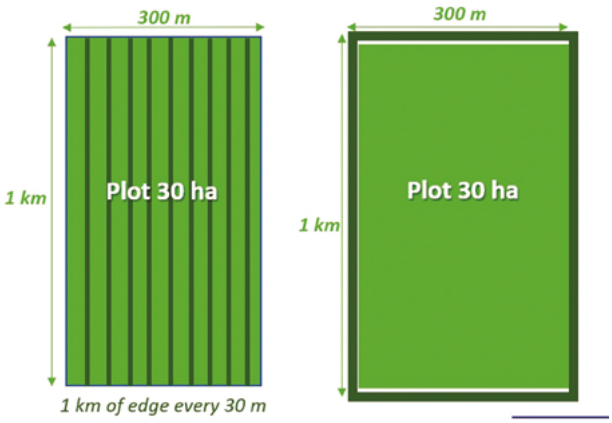


Fig.14: À gauche - Haies intra-parcellaires: pour 30 ha, il y a une haie tous les 30 m, soit 150 mètres linéaires/ha de haies intra-parcellaires

À droite - Haies autour de la parcelle: pour 30 ha, il y a 2 600 mètres linéaires de périmètre, soit 90 mètres linéaires/ha de haies autour du périmètre (source interne)

Ces valeurs de stockage sont calculées à partir des chiffres de la méthode des haies du label bas-carbone et du projet Carbocage de l'ADEME [25].

À SAVOIR:

- **Privilégier les orientations nord-sud pour limiter et équilibrer l'ombre des arbres et arbustes sur les vignes.**
- **Laisser une distance minimale de 3 à 4 mètres entre la haie et le rang de vigne.**

REFERENCES

1. Masson-Delmotte V. et al., (2019). Climate change and land : an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. https://digitallibrary.un.org/record/3893424?v=pdf&ln=fr

2. Compost ed estratti per la sostenibilità dei sistemi agricoli. Agrifoglio n.105 - Settembre-Ottobre 2021. https://feder.bio/wp-content/uploads/2017/07/Compost-ed-estratti-per-la-sostenibilita-dei-sistemi-agricoli.pdf

3. Persiani A., et all. (2023). Il compost tea. Poster. https://feder.bio/wp-content/uploads/2017/07/Compost-ed-estratti-per-la-sostenibilita-dei-sistemi-agricoli.pdf

4. Pilla, N., et al. (2023). Effect of Compost Tea in Horticulture. *Horticulturae*, 9(9), 984. https://doi.org/10.3390/horticulturae9090984

5. Sujit A. (2012). Vermicompost, the story of organic gold: A review. *Agricultural Sciences*, 7 (3), 905-917. 10.4236/as.2012.37110

6. Yatoo, A.M., et al (2021). Sustainable management of diseases and pests in crops by vermicompost and vermicompost tea. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 41, 7. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00657-w

7. Fernando V., et al. (2024). Straw mulching increases soil health in the inter-row of citrus orchards from Mediterranean flat lands. *European Journal of Agronomy*, *155*, 127115. https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127115

8. Colloque Viticole et Œnologique Parc des Expositions d'Angers. (2024). Compte rendu technique gestion intégrée des sols en viticulture. Colloque EUROVITI IFV. https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2024/01/COLLOQUE-EUROVITI-2024.pdf

9. Ellie M. A. et al. (2024). Almond hull and shell organic matter amendments increase microbial biomass and multifunctionality in orchard soil and the undisturbed organic layer. *Applied Soil Ecology*, *197*, 105321. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105321

10. Zuber C. et al. (2017). Adding Almond Hull and Shell to a Producing Almond Orchard: Feasibility and Tree Health Impacts. UCCE https://rd.almondboard.com/files/Adding%20Almond%20Hull%20and%20Shell%20to%20a%20Producing%20Almond%20Orchard_Feasibility%20and%20Tree%20Health%20Impacts.pdf

11. European Commission. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN

PARLIAMENT AND THE COUNCIL. Brussels, 15.12.2021. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2021-12/com_2021_800_en_0.pdf

12. Official Journal of the European Union. Commission Implementing Regulation (EU) 2021/1165 of 15 July 2021 authorising certain products and substances for use in organic production and establishing their lists (Text with EEA relevance). https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/1165/oj

13. Nogués, I. et al. (2023). Biochar soil amendment as carbon farming practice in a Mediterranean environment. *Geoderma Regional*, *33*, e00634. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00634

14. LE PROJET OAD MO. (2024). Fiche introductive des fiches scénarios « La responsabilité du ministère chargé de l'agriculture ne saurait être engagé ». https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2024/09/Le-projet-OAD-MO.pdf?_rt=MXwxfGNvbXB-vc3R8MTczMjUyOTMwNA&_rt_nonce=ebfbe202b4

15. Gontier L. (2018). Engrais vert en viticulture. IFV Pôle Sud-Oues. https://www.vignevin-occitanie.com/wp-content/uploads/2018/10/8-engrais-vert-viticulture.pdf

16. Gontier L. and Prezman F.(2023). Pratiques, performances, restitutions d'azote et stockage du carbone. Engrais verts. https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2023/05/2-Engrais_verts_pratiques_performances.pdf

17. Aguilera-Huertas, J. et al. (2024). Intercropping in rainfed Mediterranean olive groves contributes to improving soil quality and soil organic carbon storage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *361*, 108826. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108826

18. Demir Z. (2020). Quantifying some physical properties and organic matter of soils under different management systems in cherry orchard. Eurasian J Soil Sci 2020, 9 (3), 208 – 221. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1152487

19. Cárceles RodríguezA., M. et al. (2021). Cover Crop Contributions to Improve the Soil Nitrogen and Carbon Sequestration in Almond Orchards (SW Spain). *Agronomy*, *11*(2), 387. https://doi.org/10.3390/agronomy11020387

20. Özbolat, O. et al. (2022). Long-term adoption of reduced tillage and green manure improves soil physicochemical properties and increases the abundance of beneficial bacteria in a Mediterranean rainfed almond orchard. *Geoderma*, *429*, 116218. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116218

21. Carranca, C. et al. (2022). Enhancing Carbon Sequestration in Mediterranean Agroforestry Systems: A Review. *Agriculture*, *12*(10), 1598. https://doi.org/10.3390/agriculture12101598

22. Liu X, et al. (2006). Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation - a review. Plant Soil Environ, 52(12):531-543. DOI: 10.17221/3544-PSE

23. Gómez-Rey, M. X. et al. (2012). Soil organic-C accumulation and N availability under improved pastures established in Mediterranean oak woodlands. *Soil Use and Management*, *28*(4), 497-507. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00428.x

24.. Pellerin S. et al. (2021). Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ?. Versailles : Ed. Quae, 235 p. (Matière à débattre et décider) ISBN 978-2-7592-3148-5 http://doi.org/10.35690/978-2-7592-3149-2

25. Ministère de l'Agriculture. Méthode haies. Bulletin Officiel Version du 08/06/2021. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/M%C3%A9thode%20haies%20LBC%20VF.pdf