Tirer parti de l'intelligence artificielle pour gérer une transition durable dans la viticulture « STIV »

MODULE 3 : Transition verte et énergétique

Ce module explore les principales stratégies de durabilité en viticulture, de la gestion régénérative des sols (principalement les couverts végétaux ici) et l'efficacité hydrique à la conservation de la biodiversité et l'utilisation responsable de l'énergie. Il analyse les technologies innovantes et les pratiques agroécologiques qui réduisent l'empreinte environnementale et augmentent la résilience des vignobles au changement climatique. L'objectif est de comprendre comment les pratiques écologiques deviennent un pilier essentiel d'une viticulture compétitive et durable, en phase avec le Pacte vert pour l'Europe.

Des exercices sont proposés en annexe pour compléter le module.

Mentions légales

Cofinancé par l'Union européenne. Toutefois, les points de vue et opinions exprimés sont ceux des auteurs et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'Union européenne ou de l'Agence exécutive européenne pour l'éducation et la culture (EACEA). Ni l'Union européenne ni l'EACEA ne peuvent en être tenues responsables.

Date : 20/02/2026

Le consortium STIV

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

Contenu

1. Pratiques écologiques en viticulture : principes fondamentaux et stratégies 3
1.1. Gestion durable des sols en viticulture 3
1.2. Efficacité de l'utilisation de l'eau et technologies d'irrigation dans la viticulture durable 7
1.3. Gestion de la biodiversité dans le vignoble 11
1.4. Utilisation durable de l'énergie dans les vignobles 16
1.4. Valorisation des résidus de taille et de la biomasse des vignobles 21
2. Transition énergétique dans l'industrie viticole 26
2.1. Intégration des énergies renouvelables dans l'industrie viticole 26
2.2. Planification et mise en œuvre des systèmes énergétiques dans les caves 31
2.3. Stratégies de réduction de l'empreinte carbone dans la production viticole 34
2.4. Outils numériques pour le suivi de l'empreinte carbone et de la consommation énergétique 38
2.5. Coopérativisme énergétique dans les communautés viticoles 40
3. Études de cas sur la viticulture durable 49
3.1. Exemples de réussite en matière de transition énergétique et de viticulture durable 49
3.2. Analyse comparative des modèles durables en viticulture 52
3.3. Impact économique et environnemental de la transition énergétique sur les caves viticoles 54
Références 58
Annexe I – Questions examinées 63
Annexe II – Activité didactique : « Concevoir un vignoble durable » 65
Références 67

Co-funded by the European Union
Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

1. Pratiques écologiques en viticulture : principes fondamentaux et stratégies

La transition vers une viticulture durable nécessite une vision globale qui englobe tous les composants de l'écosystème de production. Le vignoble, en tant qu'agroécosystème, dépend de la santé des sols, d'une utilisation efficace de l'eau, de la conservation de la biodiversité et d'une gestion responsable de l'énergie. Ces quatre piliers interdépendants permettent de réduire l'impact environnemental de la vinification, d'accroître la résilience au changement climatique et de garantir la qualité du vin à long terme.

1.1. Gestion durable des sols en viticulture

La gestion durable des sols est l'un des piliers fondamentaux de la transition écologique de la viticulture. Le sol n'est pas seulement le support physique de la vigne, mais aussi un écosystème vivant qui régule la fertilité, le cycle de l'eau, la biodiversité microbienne et la résilience de la culture aux impacts du changement climatique (Bavaresco et al., 2016). Dans ce contexte, les pratiques conventionnelles basées sur un labour intensif, l'utilisation excessive d'engrais chimiques et d'herbicides synthétiques ont démontré des effets négatifs tels que le compactage du sol, la perte de matière organique et la diminution de la biodiversité (Morlat & Symoneaux, 2008). Face à ce scénario, il est nécessaire de mettre en œuvre des stratégies régénératrices et durables qui optimisent la santé des sols et renforcent les écosystèmes viticoles.



Importance de la santé des sols en viticulture

Le sol agit comme un réservoir de nutriments et d'eau, régule les échanges gazeux et abrite des micro-organismes essentiels à la minéralisation et à la disponibilité des nutriments (Tautges et al., 2019). Des études récentes ont montré que la dégradation des sols dans les régions viticoles, causée par un labour excessif et la perte de matière organique, réduit la capacité du sol à retenir l'eau, augmentant ainsi la vulnérabilité des vignobles à la sécheresse (Van Leeuwen et al., 2019). De plus, sa structure physique

influence directement la vigueur de la vigne, la qualité des raisins et, par conséquent, le profil sensoriel du vin (Bordelon et al., 2020).

Les toitures végétalisées: une pratique indispensable

La mise en place de couvertures végétales dans les vignobles est l'une des stratégies les plus efficaces pour améliorer la santé des sols. Les couvertures permanentes ou temporaires réduisent l'érosion hydrique, améliorent l'infiltration de l'eau et contribuent à la fixation du carbone, atténuant ainsi le changement climatique (Celette et al., 2008). Elles favorisent également l'augmentation de la matière organique et de l'activité microbienne, éléments clés pour la fertilité des sols (Abad et al., 2021).

Par exemple, dans les vignobles méditerranéens, la plantation d'espèces légumineuses (trèfle, vesce) comme couverture végétale a permis d'augmenter considérablement la teneur en azote disponible, réduisant ainsi la dépendance aux engrais synthétiques (Ruiz-Colmenero et al., 2013). En outre, les couvertures favorisent la biodiversité fonctionnelle, offrant des habitats aux insectes auxiliaires qui contribuent à la lutte biologique contre les ravageurs (Garcia et al., 2018).



Figure 1. Couverture végétale dans un vignoble. *Source : La Rioja Alta*

Réduction du travail du sol et manipulation minimale

Le travail intensif du sol entraîne la rupture des agrégats, la perte de porosité et la diminution de la matière organique, accélérant ainsi les processus d'érosion (Prosdocimi et al., 2016). En revanche, les pratiques de travail réduit ou nul du sol se sont imposées comme des alternatives durables qui préservent la structure du sol, améliorent l'infiltration et réduisent les pertes de carbone (Novara et al., 2019).

Une étude menée dans les vignobles de l'Alto Monferrato (Italie) a montré que la combinaison d'un couvert végétal et d'un travail réduit du sol réduisait considérablement le ruissellement et l'érosion du sol, tout en améliorant la stabilité des agrégats et

l'infiltration par rapport aux sols nus (Biddoccu et al., 2016). Par coïncidence, des études récentes soulignent que l'utilisation de couvertures herbacées dans les vignobles peut réduire les pertes de sol de 30 % à 70 %, selon les espèces utilisées et les conditions climatiques (Abad et al., 2021 ; SARE, 2022). De même, des travaux de synthèse menés dans le cadre du programme « Europe de l' » ont confirmé que le travail minimal du sol contribue non seulement à préserver la structure du sol, mais aussi à réduire la consommation d'énergie et les émissions liées à l'utilisation de machines agricoles (López-Vicente et al., 2020).

Augmentation de la matière organique et utilisation de biofertilisants

L'incorporation de compost et de biofertilisants est un outil essentiel pour la régénération des sols dégradés. L'incorporation de résidus viticoles tels que le marc et les lies dans le compostage peut améliorer les propriétés du compost, telles que sa structure physique et son humidité, contribuant ainsi au recyclage des nutriments dans le vignoble (Arqueros et al., 2023). La matière organique du sol est également associée à une plus grande capacité d'échange cationique, à une meilleure rétention d'eau dans les champs et à la promotion d'une microflore bénéfique (Ismail, 2025 ; Lal, 2020 ; Ankenbauer & Loheide, 2016).

Diverses études ont montré que l'incorporation de compost issu des déchets des caves améliore la matière organique du sol, augmente sa capacité de rétention d'eau et stimule l'activité microbienne bénéfique, favorisant ainsi la fertilité et la résilience de l'agroécosystème (Lucchetta et al., 2025 ; Moral et al., 2016). Bien que les effets quantitatifs varient selon la région, le type de compost et la fréquence d'application, les données disponibles indiquent une augmentation significative du carbone organique et de la biomasse microbienne du sol après plusieurs campagnes d'application.



Figure 2. Utilisation de marc de raisins pour les biofertilisants.

Pratiques visant à améliorer la rétention d'eau

Dans un contexte de phénomènes météorologiques extrêmes et de disponibilité réduite en eau, il est essentiel d'augmenter la capacité du sol à retenir l'eau. L'utilisation de couvertures végétales dans les vignobles améliore la structure du sol, augmente sa porosité et favorise une meilleure infiltration et rétention de l'eau (Morlat & Jacquet, 2003). De même, l'application d'un paillage organique, tel que de la paille ou des résidus végétaux, contribue à conserver l'humidité de surface en réduisant l'évaporation et en améliorant la capacité en eau disponible, en particulier dans les écosystèmes agricoles méditerranéens semi-désertiques (Hueso-González et al., 2016 ; Wikipédia, s.d.).

Exemples et certifications

De nombreux vignobles ont mis en œuvre ces pratiques dans le cadre de certifications telles que **« Sustainable Winegrowing »** (Californie) ou **« HVE – Haute Valeur Environnementale »** (France), qui encouragent les stratégies de gestion durable des sols. En Espagne, des projets tels que **« Viñas Vivas »** ont démontré une réduction de 40 % de l'utilisation d'herbicides grâce à la mise en place d'une couverture végétale et à la biofertilisation (MAPA, 2022).

1.2. Efficacité de l'utilisation de l'eau et technologies d'irrigation dans la viticulture durable

L'eau est l'une des ressources les plus limitées en viticulture, en particulier dans les régions méditerranéennes où les précipitations sont irrégulières et où les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquentes en raison du changement climatique (Ollas et al., 2019). Dans ce contexte, l'efficacité dans l'utilisation de l'eau représente non seulement une exigence agronomique, mais aussi une obligation éthique et réglementaire pour garantir la durabilité du vignoble (Jones et al., 2010). Une gestion efficace de l'eau consiste à appliquer la bonne quantité d'eau, au bon moment et au bon endroit, en évitant les pertes dues à l'évaporation, à la percolation profonde ou au ruissellement (Allen et al., 1998).



Figure 3. Système d'irrigation goutte à goutte. Source : Lena Ti

Importance d'une gestion durable de l'eau

La vigne est une plante considérée comme modérément résistante à la sécheresse, mais un stress hydrique sévère pendant des étapes telles que la floraison et la nouaison peut réduire considérablement le rendement et la qualité des fruits (Medrano et al., 2015). Cependant, il a été démontré qu'un déficit hydrique contrôlé améliore certains paramètres tels que la concentration en anthocyanes et l'intensité de la couleur du vin (Intrigliolo & Castel, 2011). En outre, l'adoption de systèmes d'irrigation intelligents combinant des techniques telles que l'irrigation déficitaire régulée (RDI), des capteurs, la modélisation et les technologies à distance, gagne du terrain dans les régions où les ressources en eau sont limitées, améliorant ainsi la gestion de l'eau et l'efficacité de son utilisation (Mirás-Avalos et al., 2021).

Technologies clés pour l'efficacité hydrique

a) Irrigation goutte à goutte et souterraine

L'irrigation goutte à goutte est la technique la plus répandue dans la viticulture moderne en raison de sa grande efficacité pour apporter l'eau directement à la zone

racinaire et minimiser les pertes dues à l'évaporation, à la percolation et au ruissellement. Dans des pays comme l'Espagne, en particulier dans les régions à faible pluviométrie comme la Castille-La Manche, l'irrigation goutte à goutte est largement adoptée. En outre, l'irrigation souterraine (SDI) ou ses variantes, telles que l'irrigation directe de la zone racinaire, permettent d'améliorer encore l'efficacité de l'utilisation de l'eau et le rendement. Par exemple, l'étude « Optimisation de la gestion de l'eau dans les vignobles : défis, stratégies et perspectives » menée en 2021 a fait état d'une augmentation de 9 à 12 % de la production et de 9 à 11 % de l'efficacité de l'utilisation de l'eau par rapport à l'irrigation de surface.

b) Capteurs d'humidité et de potentiel hydrique

L'intégration de capteurs d'humidité du sol, tels que les capteurs tensiométriques, capacitifs ou à réflectométrie temporelle (TDR), permet de connaître le contenu volumétrique en eau en temps réel et d'améliorer la programmation de l'irrigation des cultures. Des études récentes soulignent que l'intégration de ces outils dans les modèles de bilan hydrique contribue à optimiser l'utilisation de l'eau, en évitant les excès et en réduisant les pertes dues à la percolation ou au ruissellement (Jones, 2004).

En outre, les technologies physiologiques telles que les capteurs de flux de sève fournissent des informations directes sur les besoins en eau des plantes. Ces systèmes permettent de détecter rapidement les situations de stress avant que la photosynthèse ou le rendement ne diminuent, offrant ainsi une base plus précise pour la prise de décision en matière de gestion de l'irrigation (Kumar, 2022 ; Jones, 2004).



Figure 4. Capteur de flux de sève. Source : Agronic

c) Modèles d'équilibre hydrique et DSS

L'utilisation de modèles tels que FAO-56 sert de base à l'estimation de l'évapotranspiration des vignobles, en intégrant les paramètres climatiques (ET_0), les coefficients de culture et les facteurs de stress hydrique (Allen et al., 1998). Des modèles avancés tels qu'AquaCrop ont prouvé leur utilité en viticulture : dans les vignobles de table au Mexique, le modèle a recommandé des volumes d'irrigation environ 50 % inférieurs à ceux traditionnellement appliqués par les agriculteurs, ce qui a permis d'améliorer de près de 45 % la productivité de l'eau (Er-Raki, 2024).

De manière complémentaire, des outils d'équilibre hydrique tels que SIMDualKc, basés sur le double coefficient de culture, ont permis d'estimer avec précision l'évapotranspiration dans les vignobles pluviaux en combinant les données climatiques avec les informations sur l'équilibre hydrique du sol, montrant un haut degré d'ajustement avec les observations réelles (Almeida et al., 2024).

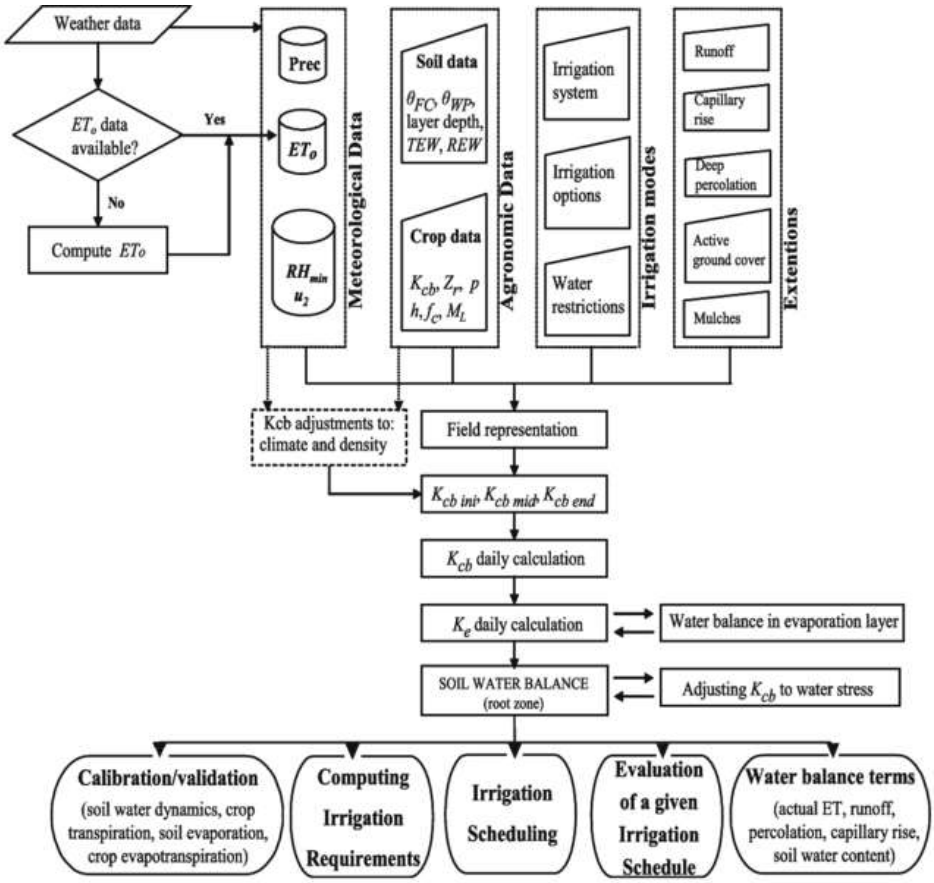

Figure 5. Organigramme du modèle SIMDualKc Source : Paço et al. 2011

d) Irrigation de précision grâce à la technologie IoT

L'Internet des objets (IoT) a révolutionné la gestion de l'irrigation dans la viticulture grâce à des plateformes numériques qui intègrent des capteurs d'humidité, des stations météorologiques et des vannes automatisées. CropX en est un exemple : cette plateforme permet de gérer l'irrigation à partir d'une application mobile et d'activer les vannes à distance grâce à l'intégration de contrôleurs d'irrigation (CropX, 2023a ; CropX, 2023b). Dans les régions où la connectivité est limitée, les protocoles réseau à faible consommation d'énergie tels que LoRaWAN et NB-IoT sont essentiels, car ils offrent une longue portée, une faible consommation d'énergie, une transmission fiable et une bonne s dans les environnements ruraux (Promwad, 2025 ; Singh et al., 2020 ; Semtech, 2025).

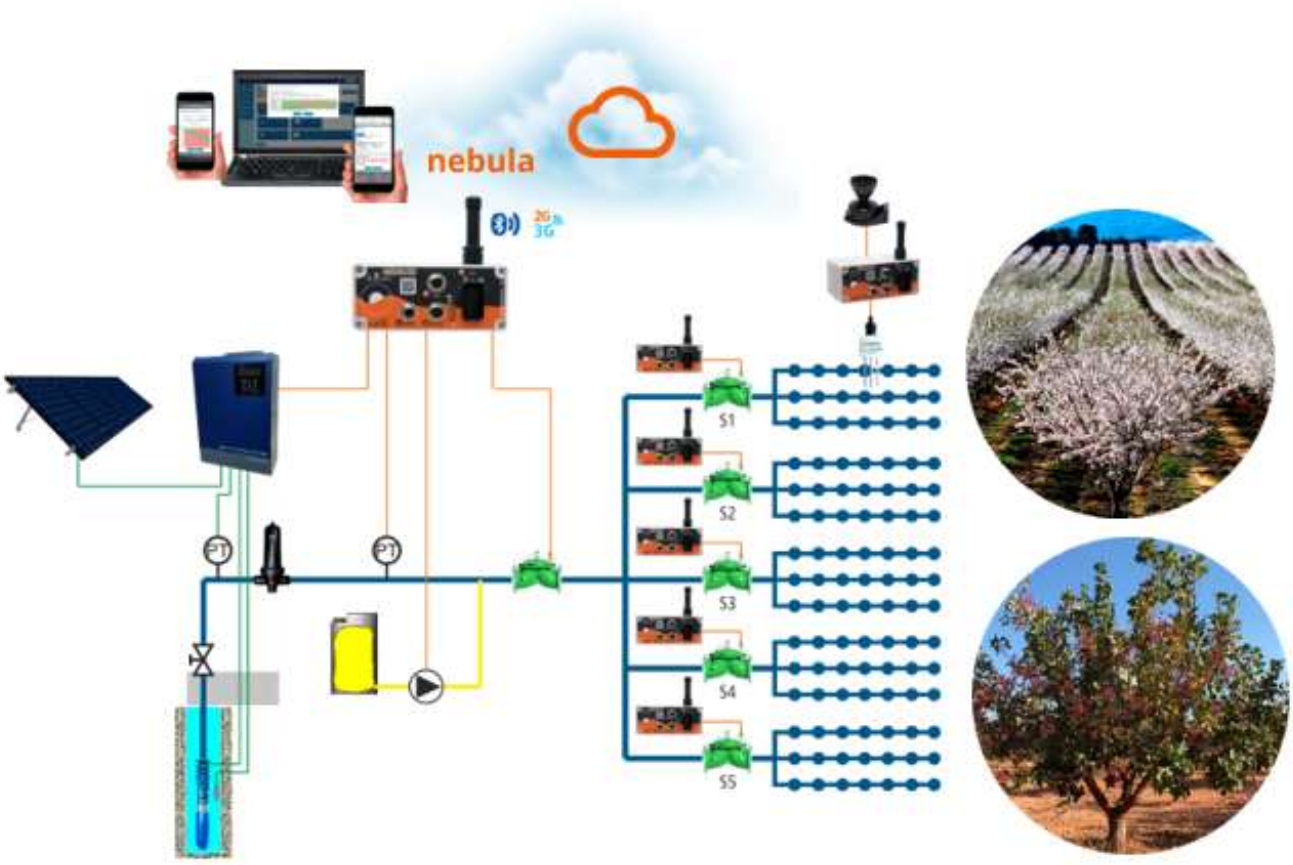

Figure 6. Irrigation de précision avec l'IoT. *Source : Orionis Smart Water Network*

Stratégies agronomiques complémentaires

Outre l'irrigation intelligente, la gestion des sols est essentielle à la conservation de l'eau dans les vignobles. Les couvre-sols contribuent à réduire l'évaporation, à augmenter l'infiltration et à améliorer la disponibilité de l'eau dans le profil du sol (Celette, Gaudin et Gary, 2008). De même, la sélection de porte-greffes résistants à la sécheresse est une stratégie efficace pour accroître la résilience du vignoble face à la pénurie d'eau (Gambetta, Herrera, Dayer, Hochberg, & Castellarin, 2020).

Avantages prouvés et rendement économique

Les économies d'eau dans les vignobles permettent non seulement de réduire les coûts directs, mais contribuent également à la durabilité énergétique, étant donné que l'irrigation mécanisée et le pompage sont de grands consommateurs d'énergie (GESTI, 2025). En outre, il est prouvé que la mise en œuvre de systèmes d'irrigation intelligents, tels que la surveillance continue et l'automatisation, peut réduire considérablement la consommation d'eau et d'énergie, avec des économies rapportées entre 20 % et 50 % selon la culture (FreshPlaza, 2022).

D'autre part, comme mentionné ci-dessus, le stress hydrique contrôlé a des effets positifs sur la qualité du vin, en améliorant la concentration des composants phénoliques

et la complexité aromatique qui caractérisent les vins haut de gamme (Van Leeuwen & Darriet, 2016).

Exemples de mise en œuvre

- **Californie :** E&J Gallo **a fait état** d'économies en matière de consommation d'eau après avoir mis en place des capteurs d'humidité et un système d'aide à la décision (DSS) relié à un système d'irrigation goutte à goutte (Gallo Winery, 2021).
- **Australie :** des projets pilotes utilisant **l'IoT et la télémétrie** ont permis de réduire la consommation d'eau de 1 000 m^3/ha sans compromettre la production, en combinant l'équilibre hydrique et l'irrigation à déficit contrôlé (projet SmartAqua, 2020).
- **Espagne (Ribera del Duero) :** le système **WANUGRAPE 4.0** a intégré des cartes NDVI, des capteurs de sol et un système d'irrigation automatisé, permettant de réaliser 30 % d'économies d'eau et 20 % de réduction des coûts énergétiques (WANUGRAPE, 2023).

1.3. Gestion de la biodiversité dans le vignoble

La biodiversité est un pilier fondamental des systèmes viticoles durables. Le maintien d'une grande diversité biologique dans le vignoble contribue non seulement à la santé de l'écosystème, mais améliore également la résilience face aux ravageurs, aux maladies et aux phénomènes météorologiques extrêmes (Altieri & Nicholls, 2017). La biodiversité fonctionnelle favorise l'équilibre écologique, réduit la dépendance aux produits agrochimiques et favorise les services écosystémiques essentiels tels que la pollinisation, la lutte biologique et l'amélioration de la fertilité des sols (Bàrberi et al., 2010).



Figure 7. Prévention des ravageurs grâce à l'utilisation de coccinelles dans les vignes. Source : Familia Torres, 2020

Importance de la biodiversité dans la viticulture

Les monocultures intensives en viticulture ont conduit à la simplification des agroécosystèmes, réduisant la biodiversité et augmentant la vulnérabilité du vignoble aux ravageurs et aux maladies (Altieri & Nicholls, 2002). Au contraire, l'adoption de stratégies de diversification structurelle, telles que l'intégration d'arbres, de haies ou de toits verts, contribue à réduire l'incidence des ravageurs, à diminuer l'utilisation de produits

agrochimiques et à promouvoir la fourniture de services écosystémiques essentiels (Favor et al., 2023).

Stratégies visant à accroître la biodiversité

a) Couvert végétal

Les couvertures végétales permanentes ou temporaires sont une pratique clé pour promouvoir la biodiversité. Ces espèces herbacées, implantées entre les rangs, augmentent la diversité floristique, abritent les ennemis naturels des ravageurs et améliorent la structure du sol (Celette et al., 2009). En outre, elles contribuent à réduire l'érosion, à augmenter l'infiltration de l'eau et à améliorer la fertilité organique. Par exemple, des études menées dans des vignobles du Languedoc-Roussillon ont montré que la présence de couvertures végétales à base d'herbes et de légumineuses réduisait la population de thrips et d'acariens de 30 % par rapport aux sols nus (Ripoche et al., 2011).

b) Corridors écologiques et haies

La mise en place de haies périphériques et de corridors verts relie le vignoble aux habitats naturels, créant ainsi des refuges pour les oiseaux, les pollinisateurs et les arthropodes utiles (Bàrberi et al., 2010). En Toscane, l'intégration de haies d'espèces indigènes dans les vignobles biologiques a augmenté la présence de parasitoïdes naturels de Lobesia botrana, réduisant ainsi l'utilisation d'insecticides (Gurr et al., 2017).

c) Intégration de polycultures et de zones refuges

La combinaison de vignobles avec des oliveraies, des vergers ou de petites parcelles de végétation naturelle génère une mosaïque agroécologique qui favorise la biodiversité. Cette stratégie, connue sous le nom de viticulture intégrée, est promue par l'OIV (Organisation internationale de la vigne et du vin) comme un modèle de transition vers des systèmes résilients (OIV, 2020).

d) Conservation de la faune auxiliaire

Les espèces telles que les chrysopes, les coccinelles et les araignées sont des prédateurs naturels qui contribuent à lutter contre les ravageurs. Il est essentiel de réduire l'utilisation d'insecticides à large spectre et de promouvoir la création de refuges pour ces organismes afin de maintenir leur population stable (García et al., 2018). À Bordeaux, la mise en place de nichoirs pour les oiseaux insectivores a permis de réduire de 50 % la pression exercée par la tordeuse de la grappe (Lobesia botrana) dans les vignobles biologiques (Maison & Filaine, 2021).

Avantages de la biodiversité dans le vignoble

1. **Lutte biologique naturelle :** moindre dépendance aux produits phytosanitaires.
2. **Amélioration de la santé des sols :** augmentation de la matière organique et de la capacité de rétention d'eau.
3. **Réduction de l'érosion :** les couvre-sols protègent contre la perte de sol due au ruissellement.

4. **Résilience climatique :** les vignobles riches en biodiversité sont mieux à même de résister aux vagues de chaleur et à la sécheresse (Altieri & Nicholls, 2017).
5. **Valeur ajoutée et marketing :** les certifications telles que *la Biodiversity & Wine Initiative* ou les labels de viticulture régénérative sont appréciées par les consommateurs (Stolz et al., 2011).



Figure 8. Certificats de vin biologique. *Source : piece-meal*

Défis liés à la mise en œuvre

L'intégration de mesures visant à promouvoir la biodiversité dans les vignobles représente une stratégie clé pour une viticulture plus durable et plus résiliente. Cependant, sa mise en œuvre n'est pas sans difficultés. Les défis concernent à la fois les aspects économiques et techniques, mais aussi les aspects sociaux et culturels, reflétant la complexité de l'intégration de critères écologiques dans un secteur traditionnellement orienté vers la production œnologique et la qualité. Ces facteurs sont aggravés par l'incertitude climatique, le manque de structures de soutien adéquates et les contraintes du marché, qui peuvent ralentir l'adoption généralisée de ces pratiques. Il est essentiel d'identifier et de comprendre ces défis afin de proposer des solutions adaptées à chaque territoire viticole.

- **Coût initial élevé :** l'installation de haies, de bandes fleuries ou de toitures végétalisées implique un investissement économique important, tant en matériaux qu'en main-d'œuvre. De plus, les avantages écologiques et productifs découlant de ces mesures se manifestent généralement à moyen ou long terme, ce qui peut susciter une réticence chez les viticulteurs qui travaillent avec des marges serrées ou qui recherchent des rendements rapides. Dans de nombreux cas, l'absence d'accès à des incitations économiques ou à des programmes de soutien aggrave cet obstacle.

- **Conflits agronomiques :** l'introduction d'un couvert végétal peut entrer en concurrence avec la vigne pour l'eau et les nutriments, en particulier dans les régions au climat sec ou dans les sols moins fertiles. Un mauvais choix d'espèces ou une gestion inadéquate (par exemple, ne pas faucher à temps ou ne pas ajuster les densités) peut augmenter la pression sur le vignoble, réduire le rendement ou même favoriser l'apparition de parasites et de maladies. Cela nécessite une gestion technique minutieuse et une planification adaptée à chaque parcelle.

- **Manque de connaissances techniques :** la mise en œuvre réussie des pratiques de promotion de la biodiversité nécessite une formation en agroécologie, en écologie fonctionnelle et en techniques intégrées de lutte contre les ravageurs et de gestion des sols. De nombreux travailleurs et gestionnaires de terrain ne disposent pas de la formation nécessaire, ce qui augmente le risque d'erreurs dans la planification et le maintien de ces mesures. Le manque de conseillers spécialisés en viticulture limite également l'accès à des conseils pratiques et adaptés.

- **Acceptation sociale et culturelle :** dans les régions viticoles traditionnelles, il peut y avoir une résistance à modifier des pratiques qui sont maintenues depuis des générations. La perception qu'un vignoble « avec des herbes » ou avec des « zones non cultivées » est mal entretenu peut entraîner des tensions au sein de la communauté locale, rendant difficile l'adoption d'approches plus favorables à la biodiversité.

- **Contraintes réglementaires et de certification :** bien que les politiques agricoles de l'Union européenne ou d'autres cadres réglementaires encouragent les pratiques durables, la bureaucratie associée et le manque de clarté des exigences peuvent décourager les producteurs. En outre, certains systèmes de certification peuvent ne pas reconnaître suffisamment les avantages de ces mesures, ce qui réduit la motivation à les adopter.

- **Complexité du suivi et de l'évaluation :** il n'est pas facile de mesurer l'impact réel des mesures de gestion de la biodiversité sur le vignoble. Cela nécessite des outils de suivi, des indicateurs de biodiversité et, dans de nombreux cas, une collaboration avec des instituts de recherche. Sans ce suivi, il est difficile de justifier les coûts et les efforts investis ou de communiquer les avantages aux consommateurs et aux organismes de réglementation.

- **Risques climatiques et variabilité interannuelle :** des facteurs tels que des sécheresses prolongées, des précipitations abondantes ou des changements soudains de température peuvent rendre difficile la mise en place et l'entretien de haies ou de toitures. Dans les scénarios de changement climatique, ces incertitudes augmentent, ce qui soulève des doutes quant à la viabilité à long terme de certaines mesures.

- **Marché et demande limitée :** bien que de plus en plus de consommateurs accordent de l'importance à la durabilité et au respect de la biodiversité, ils ne sont pas toujours prêts à payer un prix plus élevé pour des vins produits selon ces principes. Ce décalage entre l'effort de production et la reconnaissance sur le marché peut décourager les investissements initiaux.

Exemples de mise en œuvre réussie

Malgré les défis qu'elle peut présenter dans diverses communautés, le potentiel de la gestion de la biodiversité dans les vignobles est démontré par plusieurs exemples de réussite au niveau international :

- **France (Champagne)** L'introduction systématique de couvertures végétales, de haies et de corridors verts dans la région de Champagne a permis de réduire de 40 % l'utilisation d'herbicides sur une période de 5 ans (Comité Champagne, 2022). Outre les avantages environnementaux, cette stratégie a renforcé l'image de l'appellation en tant que référence en matière de durabilité, générant une valeur ajoutée sur les marchés internationaux.

- **Espagne (Ribera del Duero) :** le projet Viñas con Vida a mis en place des refuges pour la biodiversité, notamment des hôtels à insectes, des nichoirs pour les oiseaux insectivores et la plantation d'espèces mellifères. En conséquence, une augmentation notable de la présence de pollinisateurs et un renforcement des services écosystémiques ont été observés dans les vignobles participants. Grâce à ces mesures, plusieurs caves de la région ont obtenu la certification Wildlife Friendly Alliance (WFA), qui a constitué un élément différenciateur sur le marché.

- **Afrique du Sud** L'initiative Biodiversity and Wine Initiative (BWI) est l'un des programmes pionniers à l'échelle mondiale. Grâce à des accords entre les producteurs et les organisations de conservation, plus de 112 000 hectares d'habitats naturels adjacents aux vignobles ont été protégés (BWI, 2021). Cette stratégie a non seulement permis de conserver des espèces endémiques de faune et de flore, mais a également généré un discours sur la durabilité qui a positionné les vins sud-africains sur un marché mondial de plus en plus sensible aux questions environnementales.

- **Italie (Toscane et Sicile)** Plusieurs vignobles ont opté pour des projets d'agroforesterie dans les vignobles, en intégrant des arbres et des arbustes entre les parcelles afin de favoriser la pollinisation et de réguler le microclimat. Ces

systèmes mixtes ont permis d'améliorer la rétention d'eau, de réduire l'érosion et de rendre le paysage plus attrayant, ce qui a également profité au tourisme viticole.

- **Chili (vallée de Colchagua)** En collaboration avec des ONG environnementales, certains vignobles ont créé des corridors biologiques qui relient des zones de forêt indigène fragmentées. Cela a favorisé la présence d'animaux sauvages tels que des renards et des oiseaux de proie, tout en contribuant à la réduction des parasites dans le vignoble grâce à un contrôle biologique naturel.

1.4. Utilisation durable de l'énergie dans les vignobles

L'utilisation efficace et durable de l'énergie dans la viticulture est un élément essentiel pour réduire l'empreinte carbone du secteur et évoluer vers une économie à faibles émissions. L'énergie est utilisée à différentes étapes du cycle de production, du travail du sol à l'irrigation et à la protection phytosanitaire, en passant par les opérations de récolte et le transport vers la cave. Selon *l'Organisation internationale de la vigne et du vin* (OIV, 2021), la consommation d'énergie dans la viticulture conventionnelle peut représenter jusqu'à 25 % des coûts d'exploitation, principalement en raison de l'utilisation de combustibles fossiles dans les machines agricoles et d'électricité pour les systèmes de pompage et d'irrigation.

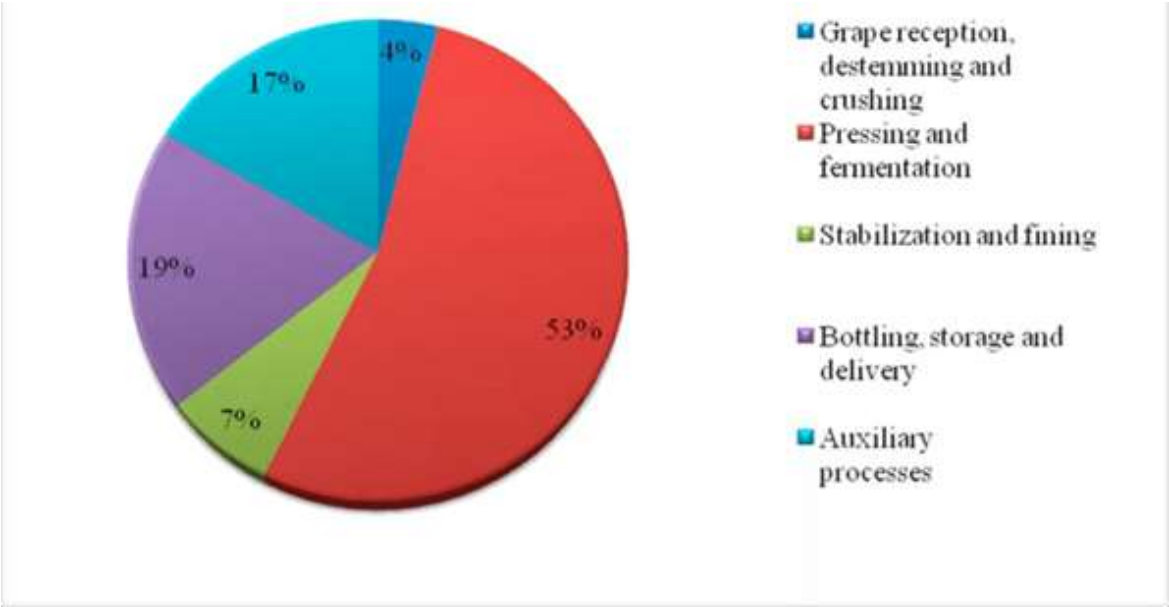

Figure 9. Répartition de la consommation d'énergie dans la production de vin dans une cave italienne. Source : Malvoni et al. 2017

Importance stratégique des économies d'énergie dans la viticulture

Le contexte actuel du changement climatique, de la crise énergétique et des politiques de décarbonisation (accord de Paris, pacte vert pour l'Europe) oblige les exploitations viticoles à optimiser leur consommation d'énergie, en intégrant des sources renouvelables et des technologies efficaces (Commission européenne, 2020). Le concept

de *neutralité climatique* dans la viticulture est de plus en plus présent, en particulier dans les appellations d'origine qui promeuvent des labels de durabilité tels que *International Wineries for Climate Action* (IWCA, 2022).

L'efficacité énergétique dans la viticulture est un objectif prioritaire, car la consommation liée à l'irrigation et à la gestion des vignobles peut représenter une part importante des coûts d'exploitation et des émissions. Des études d'analyse du cycle de vie (ACV) ont montré que la majeure partie de l'empreinte carbone provient de phases telles que la mise en bouteille, l'énergie utilisée dans les caves et les matériaux d'emballage, plutôt que de la culture elle-même (Pattara et al., 2012).

L'adoption de pratiques durables et le déploiement de technologies éco-innovantes contribuent à améliorer la durabilité opérationnelle et à répondre aux demandes des consommateurs sensibilisés au changement climatique (Brito et al., 2024).

Principales stratégies pour une utilisation durable de l'énergie

a) Audits énergétiques et suivi de la consommation

Avant de mettre en œuvre des mesures, il est essentiel de connaître le profil énergétique du vignoble. Les audits permettent d'identifier les points critiques de consommation, tels que le pompage pour l'irrigation, la climatisation des installations ou l'utilisation de tracteurs. Des outils tels que **EnergyCheck Viticulture** ou **Intelligent Rural Energy** permettent de surveiller la consommation en temps réel, facilitant ainsi la prise de décision (FAO, 2020).

b) Efficacité des machines agricoles

L'utilisation de machines plus efficaces et bien entretenues est une pratique de base. Le remplacement des tracteurs diesel par des tracteurs hybrides ou électriques, tels que le modèle New Holland T4 Electric Power, peut réduire les émissions directes jusqu'à 90 % et les coûts de carburant de 50 % (New Holland, 2022). En outre, les systèmes de guidage GPS et l'agriculture de précision réduisent les déplacements inutiles, optimisant ainsi la consommation (Matese & Di Gennaro, 2015).

c) Optimisation de l'irrigation

L'irrigation représente 40 % à 60 % de la consommation énergétique du vignoble (Allen et al., 1998). Les technologies telles que les variateurs de fréquence dans les pompes, les capteurs d'humidité du sol et l'intégration de l'énergie solaire pour le pompage photovoltaïque sont essentielles. En Espagne, le projet Solarwine a permis de réduire de 70 % le coût énergétique du pompage grâce à l'installation de panneaux solaires dans les coopératives viticoles (IDAE, 2021).

d) Intégration des énergies renouvelables

L'installation de systèmes photovoltaïques est l'option la plus répandue. Les vignobles de La Rioja et de Bordeaux ont mis en place des toits solaires dans les entrepôts et des structures légères sur les rangées, générant de l'énergie pour les systèmes de pompage et de capteurs. Dans les régions venteuses, l'énergie éolienne complémentaire

est également utilisée pour alimenter les stations météorologiques et les systèmes de surveillance (Bindi & Olesen, 2011).

e) Récupération et stockage d'énergie

L'utilisation de batteries de stockage et de systèmes hybrides garantit la continuité de l'approvisionnement dans les zones rurales où la connectivité est limitée. En outre, des micro-réseaux reliant plusieurs exploitations agricoles ont été mis en place, ce qui réduit le coût unitaire de l'énergie renouvelable (Kamilaris et al., 2017).

f) Numérisation et gestion intelligente de l'énergie

Le concept de vignobles intelligents s'applique également à la consommation d'énergie. Les plateformes IoT telles que **VitiEnergy** intègrent des données de capteurs, des prévisions météorologiques et des algorithmes d'optimisation pour déclencher automatiquement l'irrigation, l'éclairage et les processus de vinification aux moments où le coût de l'énergie est le plus bas (Wolfert et al., 2017). Cela permet de déplacer la demande vers les périodes creuses et de minimiser les pics de consommation.

Avantages de l'efficacité énergétique dans les vignobles

- **Réduction des coûts d'exploitation :** la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique, telles que la modernisation des systèmes d'irrigation, le remplacement des luminaires par la technologie LED ou l'intégration d'énergies renouvelables, peut permettre de réaliser des économies comprises entre 20 % et 40 % de la consommation totale d'énergie d'un vignoble et de sa cave associée. Ces économies sont particulièrement importantes dans les régions où l'électricité représente une part significative des coûts de production et permettent de libérer des ressources économiques qui peuvent être réinvesties dans l'innovation, la qualité œnologique ou la gestion environnementale.
- **Réduction de l'empreinte carbone :** la réduction de la consommation de combustibles fossiles et l'optimisation de l'efficacité des processus clés (irrigation, pompage, réfrigération, transport interne) permettent de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre. Cela contribue non seulement au respect des réglementations environnementales de plus en plus strictes, mais facilite également l'obtention de certifications durables (IWCA, WFA, etc.), qui sont devenues une valeur stratégique sur les marchés internationaux sensibles à la durabilité.
- **Résilience énergétique :** la diversification des sources d'énergie par l'intégration de l'énergie solaire, éolienne ou biomasse réduit la dépendance aux combustibles fossiles et aux fluctuations du marché mondial de l'énergie. Dans un contexte de volatilité des prix de l'énergie, le fait de disposer de ses propres installations permet aux vignobles de se prémunir contre les hausses imprévues et de garantir la continuité de leurs activités, même en cas de crise énergétique.
- **Valeur ajoutée en matière de marketing :** l'efficacité énergétique génère non seulement des avantages internes, mais peut également être communiquée comme faisant partie de l'identité de la marque. Des concepts tels que le vin

neutre en carbone ou la cave à zéro émission nette offrent un facteur de différenciation clair sur un marché de plus en plus concurrentiel. Pour le consommateur conscient, un vin produit avec un faible impact énergétique traduit un engagement tangible en faveur de l'environnement, ce qui augmente son attractivité et peut justifier une valeur perçue plus élevée.

Défis de la transition énergétique dans les vignobles

- **Investissement initial élevé :** l'installation de systèmes photovoltaïques, de micro-éoliennes ou de batteries de stockage nécessite des dépenses d'investissement considérables, en particulier dans les vignobles de taille moyenne ou petite, où les marges bénéficiaires sont faibles. Bien que la rentabilité soit atteinte à moyen et long terme, la dépense initiale peut constituer un obstacle pour les producteurs qui n'ont pas accès au crédit ou à un financement spécifique.
- **Maintenance et mise à jour technologique :** les technologies de production d'énergie renouvelable et d'efficacité énergétique nécessitent des contrôles réguliers, des pièces de rechange et des mises à jour logicielles. Dans les zones rurales, où l'assistance technique spécialisée est limitée, ces tâches peuvent entraîner des temps d'arrêt ou des coûts supplémentaires. En outre, l'évolution rapide des technologies signifie que les équipements installés il y a seulement 10 ans sont déjà moins efficaces ou ne bénéficient pas d'une assistance technique adéquate.
- **Absence d'incitations claires :** bien qu'il existe des aides dans le cadre de la PAC, des programmes européens (Horizon Europe, LIFE) ou des initiatives nationales de transition énergétique, leur accès est souvent conditionné par une bureaucratie complexe, des délais longs et des exigences techniques difficiles à satisfaire. Cela décourage la participation des petits et moyens producteurs, qui manquent souvent de personnel administratif pour gérer les demandes.
- **Déficit de connaissances :** la numérisation et l'automatisation des systèmes énergétiques (capteurs, logiciels de gestion, panneaux intelligents) nécessitent un niveau de formation technique qui n'est pas toujours présent dans les équipes de travail des vignobles. Sans formation spécifique, il existe un risque d'utilisation inefficace, voire incorrecte, des technologies, ce qui réduit les avantages escomptés. L'absence de programmes de formation adaptés au secteur viticole reste un défi à relever.

Exemples de mise en œuvre réussie

- **Familia Torres (Espagne) :** cette cave s'est fermement engagée dans la transition énergétique en installant des systèmes photovoltaïques qui couvrent environ 25 % de ses besoins en électricité et en investissant dans des tracteurs électriques pour remplacer progressivement sa flotte à combustion. Grâce à ces mesures, elle a réduit de 30 % ses émissions totales de CO_2 (IWCA, 2022). En outre, elle a combiné ces actions avec des projets de capture du carbone par le reboisement et la régénération des sols.



Figure 10. Installations photovoltaïques de la famille Torres. Source : Familia Torres

- **Jackson Family Wines (États-Unis) :** Basée en Californie, cette entreprise a mis en œuvre un plan ambitieux en matière d'énergies renouvelables qui comprend des micro-éoliennes, des pompes solaires et le stockage d'énergie. Elle a ainsi réalisé des économies annuelles de plus de 2 millions de kWh, renforçant ainsi sa résilience face aux sécheresses et aux coupures de courant fréquentes dans la région (Sustainable Winegrowing Alliance, 2021). Son modèle a été reproduit et sert désormais de référence dans la viticulture américaine.

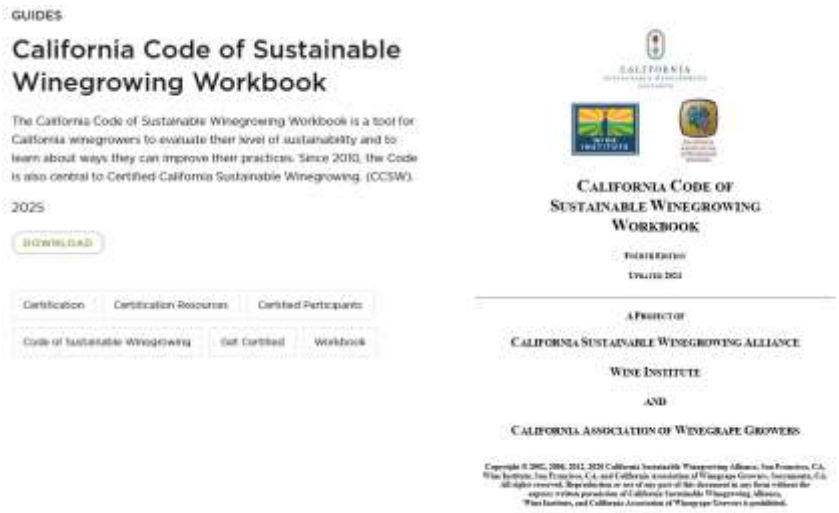

Figure 11. Manuel du code de viticulture durable de Californie. Source : California Sustainable Winegrowing Alliance

- **Château Smith Haut Lafitte (France) :** ce domaine viticole bordelais a adopté une approche durable exemplaire, alliant biodiversité, économie circulaire et efficacité énergétique. Le domaine a été le premier à capter le CO_2 libéré pendant la fermentation et à le réutiliser pour produire du bicarbonate de soude, une innovation unique dans le monde du vin, dans le cadre d'une cave souterraine à faible consommation d'énergie appelée « Stealth Cellar ». En outre, ce projet intègre également des éléments tels que l'énergie solaire, l'échange de chaleur géothermique, la récupération des eaux de pluie et l'utilisation de matériaux locaux

afin de maintenir une température stable sans avoir recours à des systèmes de refroidissement mécaniques intensifs. L'initiative va au-delà de l'efficacité énergétique : elle favorise un modèle d'économie circulaire, dans lequel les déchets agricoles et les sous-produits du domaine viticole sont utilisés de multiples façons. Par exemple, pour la production de produits de beauté, renforçant ainsi un modèle durable à la ferme.



Figure 12. Collecteur de CO2 pour les processus de fermentation. Source : Château Smith Haut Lafitte

1.4. Valorisation des résidus de taille et de la biomasse des vignobles

La gestion des résidus de taille et de la biomasse ligneuse générés dans les vignobles représente un élément stratégique de la transition vers des systèmes de production plus circulaires et résilients au changement climatique. Traditionnellement, les résidus de taille et autres résidus ligneux sont retirés du champ ou brûlés sur place. Ces pratiques génèrent des émissions directes de gaz à effet de serre, une pollution particulaire et la perte de ressources organiques potentiellement précieuses.

Dans le cadre d'une viticulture durable, ces matériaux sont de plus en plus reconnus comme des intrants stratégiques capables d'améliorer la fertilité des sols, d'augmenter la capacité de rétention d'eau et de contribuer à la séquestration du carbone à long terme. Ce changement de perspective — du traitement des déchets à la gestion des ressources — positionne le viticulteur comme un acteur actif des cycles biogéochimiques au sein du système agricole.

La Commission européenne et la FAO ont souligné que l'augmentation du carbone organique dans le sol est l'une des mesures les plus efficaces pour améliorer la santé des sols et l'adaptation au climat (Commission européenne, 2021 ; FAO, 2017). Dans ce contexte, la réintégration de la biomasse du vignoble dans le sol représente une pratique à fort potentiel environnemental et agronomique.

Des déchets aux ressources : les principes de l'économie circulaire dans le vignoble

La valorisation des résidus de taille repose sur les principes de l'économie circulaire appliqués à l'agriculture : boucler les cycles des nutriments au sein de l'exploitation

agricole. Au lieu de dépendre exclusivement d'engrais minéraux externes, les vignobles peuvent réutiliser une partie de la biomasse générée chaque année pour maintenir ou améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

La littérature scientifique montre que les systèmes agricoles intégrant des résidus organiques ont tendance à augmenter progressivement les niveaux de carbone organique du sol, améliorant ainsi la structure du sol et la stabilité des agrégats (Lal, 2004 ; FAO, 2017). Dans les régions méditerranéennes, où les sols ont souvent une faible teneur en matière organique et sont très vulnérables à l'érosion, cette pratique est particulièrement pertinente.

D'un point de vue économique, la réutilisation interne de la biomasse réduit la dépendance vis-à-vis des intrants externes et renforce l'image environnementale de la cave, un facteur de plus en plus important sur les marchés internationaux et dans les systèmes de certification de durabilité.



Figure 14. Adhérence des débris de taille au sol

Principales voies de valorisation

La mise en œuvre pratique de la réutilisation de la biomasse peut suivre différentes approches en fonction des conditions du sol, du climat, des machines disponibles et des objectifs de production.

- **Broyage et incorporation directe :** les résidus de taille sont broyés mécaniquement et répartis à la surface du sol ou légèrement incorporés. Cela accélère la décomposition et contribue à la formation d'humus. Des études sur la viticulture méditerranéenne ont montré une augmentation du carbone organique du sol et une amélioration de la stabilité structurelle grâce à des pratiques de broyage systématiques (Martínez-Casasnovas et al., 2012).

- **Compostage :** le compostage stabilise les matières organiques et produit un amendement du sol plus homogène. Il réduit les risques sanitaires et permet un

meilleur contrôle de l'équilibre carbone-azote, empêchant l'immobilisation temporaire de l'azote (FAO, 2017).

- **Paillage ou couverture de surface :** la biomasse broyée laissée à la surface agit comme un paillis protecteur, réduisant l'évaporation, supprimant les mauvaises herbes et protégeant le sol de l'érosion hydrique. Cette technique est particulièrement efficace dans les vignobles en pente sujets au ruissellement.

- **Production de biochar :** Grâce à la pyrolyse, les résidus ligneux peuvent être transformés en biochar, un matériau carboné très stable capable de rester dans le sol pendant des décennies. Le biochar améliore la structure du sol et la rétention d'eau et présente un potentiel important de séquestration du carbone (Woolf et al., 2010). Bien qu'il nécessite des investissements technologiques, son potentiel d'atténuation du changement climatique à long terme est considérable.

Avantages agronomiques observés

Les recherches menées en Europe et dans le bassin méditerranéen identifient systématiquement plusieurs effets positifs lorsque les résidus de taille sont réintégrés au sol sur plusieurs saisons :

- Augmentation de la teneur en carbone organique du sol
- Amélioration de la stabilité des agrégats et de la structure du sol
- Amélioration de l'infiltration et de la rétention d'eau
- Augmentation de l'activité microbienne
- Réduction de l'érosion dans les vignobles en pente

La FAO souligne que l'augmentation de la matière organique du sol renforce la résilience à la sécheresse et aux événements climatiques extrêmes (FAO, 2017). De plus, des études indiquent que la combinaison de l'incorporation de biomasse et des cultures de couverture amplifie les améliorations des propriétés physiques du sol et de la dynamique de l'eau (Martínez-Casasnovas et al., 2012).

Considérations techniques et limites

La valorisation des résidus de taille offre des avantages agronomiques et environnementaux évidents, mais son succès dépend d'une mise en œuvre appropriée. La réincorporation de la biomasse ligneuse dans le système viticole doit être soigneusement planifiée afin d'éviter tout effet nutritionnel ou phytosanitaire indésirable.

L'une des principales préoccupations concerne **les risques phytosanitaires**. Le bois de taille peut contenir des spores fongiques ou des agents pathogènes provenant des saisons précédentes. Dans les zones à forte pression sanitaire, les résidus doivent être finement broyés pour accélérer leur décomposition, et les matériaux visiblement infectés ne doivent pas être réincorporés. Une surveillance adéquate et un soutien consultatif sont essentiels pour prévenir le transfert d'inoculum (Rossi et al., 2012).

Un autre facteur clé est le **rapport carbone/azote (C/N)**. Les résidus ligneux sont riches en carbone et peuvent temporairement immobiliser l'azote du sol pendant leur

décomposition. Bien que cet effet soit généralement de courte durée, les plans de fertilisation doivent anticiper d'éventuels déficits temporaires, en particulier dans les sols peu fertiles (FAO, 2017).

La vitesse de décomposition dépend de la qualité du broyage, de l'humidité, de la température et de l'activité biologique du sol. Une taille de particules plus fine et des conditions environnementales favorables améliorent la décomposition et l'intégration dans la matière organique stable (Lal, 2004).

Il convient également de tenir compte **des considérations opérationnelles**. Le broyage nécessite des machines et du temps de travail supplémentaire, ce qui peut représenter une contrainte pour les petits vignobles. Les systèmes coopératifs de partage des équipements peuvent réduire cet obstacle et faciliter l'adoption de cette pratique.

L'incorporation des résidus doit être compatible avec d'autres pratiques culturales, notamment les cultures de couverture et les opérations mécaniques. Une planification intégrée de la gestion des sols permet de maximiser les avantages et de réduire les conflits (Martínez-Casasnovas et al., 2012).

Enfin, **l'amélioration des sols est progressive**. Il est nécessaire de surveiller des indicateurs tels que la matière organique du sol, la capacité d'infiltration et le rendement des vignes afin d'évaluer l'impact à long terme (Commission européenne, 2021).

Lorsqu'elle est correctement gérée, la valorisation des résidus de taille renforce la résilience des sols et soutient les objectifs d'atténuation du changement climatique. Lorsqu'elle est mal planifiée, elle peut introduire des risques agronomiques évitables. Le succès dépend de l'intégration, du suivi et de l'adaptation aux conditions locales.

Dimension économique

Bien que les avantages environnementaux soient bien documentés, les viticulteurs doivent également évaluer les implications financières. Des investissements initiaux dans du matériel de broyage ou du temps de travail supplémentaire peuvent être nécessaires. Cependant, il a été démontré que les pratiques de régénération des sols réduisent les coûts à long terme de fertilisation et d'irrigation tout en améliorant la résilience (FAO, 2017).

La viabilité économique est maximale lorsque la valorisation de la biomasse s'inscrit dans une stratégie globale de durabilité, où les améliorations environnementales se traduisent par une différenciation sur le marché et une valeur ajoutée pour la marque.

Exemples de réussite :

- **VineAdapt (Espagne) :** Le projet LIFE VineAdapt a évalué les mesures d'adaptation au changement climatique dans les vignobles espagnols. L'utilisation de résidus broyés comme paillis de surface a permis de réduire les taux d'évaporation et d'améliorer la rétention d'eau dans le sol, contribuant ainsi à réduire les besoins en irrigation en période de sécheresse.

- **VITIREG (Espagne, Portugal et France) :** Le projet VITIREG a travaillé à la promotion de pratiques régénératrices dans les vignobles, notamment le broyage des sarments de vigne et leur retour au sol comme stratégie pour augmenter la matière organique et améliorer la structure du sol.

  Les essais ont démontré que l'incorporation continue de biomasse favorise l'activité biologique et contribue à une résilience accrue à la sécheresse, en particulier dans les zones méditerranéennes à faible fertilité naturelle.



Figure 14. Consortium VITIREG

- **Institut Français de la Vigne et du Vin (France) :** L'IFV a mené des programmes expérimentaux à long terme sur l'incorporation de résidus de taille broyés. Les résultats indiquent une augmentation progressive du carbone organique du sol et une amélioration de la stabilité structurelle, en particulier lorsqu'elle est combinée à une culture de couverture permanente.

2. Transition énergétique dans l'industrie viticole

La transition énergétique est l'un des plus grands défis et, en même temps, l'une des principales opportunités pour l'industrie viticole dans le contexte actuel de crise climatique et de transition vers une économie à faible émission de carbone. Le secteur viticole, traditionnellement gourmand en énergie dans des phases telles que la vinification, le stockage, la climatisation et le transport, est confronté à la nécessité de réduire sa dépendance aux combustibles fossiles et de s'orienter vers des modèles de production conformes au Pacte vert européen et aux engagements internationaux visant à atténuer le changement climatique (Commission européenne, 2020).

Dans ce scénario, l'intégration des énergies renouvelables, l'optimisation de l'efficacité énergétique et l'adoption de systèmes de gestion numériques deviennent des piliers stratégiques. Ces mesures permettent non seulement de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), mais aussi de contribuer à améliorer la compétitivité, à réduire les coûts d'exploitation et à renforcer la réputation des caves en matière de durabilité aux yeux de consommateurs de plus en plus sensibilisés (OIV, 2021).

La transition énergétique dans la viticulture ne doit donc pas être comprise uniquement comme une obligation environnementale, mais comme un changement structurel qui stimule l'innovation technologique, favorise l'économie circulaire et ouvre de nouvelles possibilités de différenciation sur un marché mondial hautement concurrentiel.



Figure 15. Installation du « système d'ombrage intelligent » de la cave San Gabriel. Source : Laura Cano Liébana, 2022

2.1. Intégration des énergies renouvelables dans l'industrie viticole

L'objectif principal de la transition énergétique dans l'industrie viticole est de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de minimiser l'empreinte carbone, conformément aux engagements internationaux en matière de changement climatique et

aux lignes directrices du Pacte vert pour l'Europe (Commission européenne, 2020). L'intégration des énergies renouvelables dans les caves et les vignobles répond non seulement à une exigence environnementale, mais aussi à une opportunité économique, car elle réduit les coûts énergétiques à long terme, garantit l'autonomie énergétique et améliore l'image de durabilité aux yeux de consommateurs de plus en plus sensibilisés (Stolz et al., 2011).

L'Organisation internationale de la vigne et du vin (OIV) a identifié l'énergie comme un facteur clé dans la stratégie de durabilité du secteur, en encourageant l'intégration de systèmes renouvelables comme pilier fondamental pour atteindre la neutralité climatique (OIV, 2021). Parmi les principales sources renouvelables pouvant être intégrées dans l'industrie viticole, on trouve :

a) L'énergie photovoltaïque et solaire thermique

L'énergie solaire est l'option renouvelable la plus largement adoptée dans la viticulture et les caves en raison de l'abondance du rayonnement solaire dans les régions viticoles méditerranéennes, latino-américaines et californiennes (FAO, 2020). Il existe deux technologies principales :

- **Systèmes photovoltaïques (PV) :** ils transforment le rayonnement solaire en électricité grâce à des panneaux installés sur les toits des caves, des entrepôts ou même sur les rangées de vignes (*agrivoltaïque*). Cette énergie alimente les équipements de pompage pour l'irrigation, les systèmes de réfrigération dans la cave et les machines électriques. Des études menées dans des vignobles de Castille-La Manche et de Bordeaux montrent une réduction pouvant atteindre 70 % des factures d'électricité grâce à la combinaison de l'autoconsommation photovoltaïque et de batteries (IDAE, 2021).
- **Énergie solaire thermique :** elle est principalement utilisée pour chauffer l'eau dans les processus de nettoyage des barriques, les cuves et les systèmes de climatisation des caves. Un cas emblématique est celui de **Bodegas Torres (Espagne),** qui a intégré des capteurs solaires thermiques, réduisant ainsi de 30 % la consommation de gaz pour l'eau chaude (IWCA, 2022).

Avantages :

- Réduction des émissions directes et de la dépendance énergétique.
- Possibilité *d'agrivoltaïque*, qui réduit l'évaporation dans le vignoble et génère une ombre bénéfique dans les climats chauds (Ravi et al., 2022).
- Résilience énergétique face aux crises et à la volatilité des prix.

  Valeur ajoutée en matière de marketing (vin neutre en carbone) avec accès à des financements verts et à des incitations fiscales, de plus en plus liés à des projets durables.
- Amélioration de la traçabilité et de la transparence, grâce à la possibilité de surveiller la consommation en temps réel.

Défis :

- Investissement initial élevé et besoin d'espace d'installation.
- Production intermittente nécessitant des systèmes de stockage ou de raccordement au réseau.
- Maintenance et mise à jour technologique dans les zones rurales.
- Absence d'incitations claires et bureaucratie complexe.
- Manque de connaissances techniques.
- Conditions géographiques et climatiques.
- Retour sur investissement à moyen/long terme.
- Incompatibilités possibles avec le paysage ou le patrimoine, en particulier dans les vignobles historiques.
- Dépendance vis-à-vis de fournisseurs de technologies externes, pouvant entraîner des coûts supplémentaires ou un manque d'autonomie.



Figure 16. Agrivoltaïque. Source : Iberdrola

b) Biomasse viticole : valorisation des marcs et des sarments

La viticulture génère chaque année de grands volumes de déchets organiques, notamment des marcs, des tiges, des lies et des sarments. Traditionnellement, ces sous-produits étaient considérés comme ayant une faible valeur ajoutée, souvent destinés à être éliminés ou à être utilisés de manière limitée dans des amendements agricoles. Cependant, dans le cadre de l'économie circulaire et de la transition énergétique, ces déchets ont été réévalués comme des sources stratégiques d'énergie renouvelable et comme des intrants pour améliorer la durabilité des systèmes viticoles (Pérez-Pérez et al., 2021).

La biomasse viticole peut être utilisée grâce à différentes technologies : combustion directe, gazéification, digestion anaérobie pour le biogaz ou pyrolyse pour la production de biocharbon et de biohuiles. Ces applications permettent de transformer les déchets en énergie thermique et électrique, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et évitant les émissions liées au transport et à l'élimination finale des déchets. En outre, l'utilisation de la biomasse contribue à boucler le cycle de production du vignoble, en restituant au sol des nutriments et du carbone stable sous forme de biochar, ce qui améliore la fertilité et la capacité de rétention d'eau.

- **Marc :** résidu de vinification composé de peaux, de pépins et de restes de pulpe. Il peut être séché et utilisé comme biomasse solide ou transformé en granulés pour les chaudières à biomasse. Dans la Rioja, le projet Biovino a réussi à convaincre plusieurs caves de couvrir 100 % de leurs besoins thermiques hivernaux avec du marc séché, évitant ainsi l'émission d'environ 1 500 tonnes de CO_2 par an (González et al., 2022).
- **Pousses de vigne :** déchets de taille de la vigne qui, une fois broyés et séchés, sont utilisés comme biomasse pour les chaudières ou comme matière première pour la production de biochar. Ce dernier génère non seulement de l'énergie dans le processus de production, mais lorsqu'il est appliqué au sol, il améliore la rétention des nutriments et de l'eau et agit comme un puits de carbone à long terme (Lehmann & Joseph, 2015).

Avantages

- Réduction des déchets et des coûts de gestion.
- Substitution partielle ou totale des combustibles fossiles.
- Synergie avec la fertilisation des sols si du biochar est produit.
- Utilisation locale des ressources, réduction des coûts de transport et augmentation de l'autonomie énergétique de la cave.
- Contribution à l'atténuation du changement climatique, grâce à la séquestration du carbone et à la réduction des émissions par rapport à l'utilisation du diesel ou du gaz naturel.

Défis :

- Besoin de logistique pour la collecte, le séchage et le stockage des déchets.
- Besoins spécifiques en machines pour la pelletisation ou le conditionnement du matériau.
- Variabilité saisonnière de la disponibilité de la biomasse, qui oblige à planifier l'accumulation et le stockage pour couvrir la demande annuelle.
- Émissions possibles de particules lors de la combustion, qui nécessitent des systèmes de filtrage et le respect des réglementations environnementales pour leur contrôle.



Figure 17. Collecte des sarments de vigne en vue de leur valorisation. Source : John O'Ryan

c) Micro-éolien et géothermique

Bien que moins répandues que l'énergie solaire et la biomasse, ces technologies font leur apparition dans des projets pilotes, en particulier dans les caves à vin à forte demande thermique ou situées dans des régions venteuses.

- **Micro-éolien :** turbines à petite échelle (puissances inférieures à 50 kW) installées dans des zones où les vents sont réguliers. Elles sont utilisées pour alimenter des systèmes de réfrigération, l'éclairage ou la recharge de machines électriques. Le groupe **Jackson Family Wines**, dans l'Oregon, a intégré des microturbines en combinaison avec des panneaux photovoltaïques, générant 40 % d'énergie renouvelable sur place (Sustainable Winegrowing Alliance, 2021).



Figure 18. Énergie éolienne dans les vignobles. Source : Diario de Jerez.

- **Énergie géothermique :** elle consiste à exploiter l'énergie thermique du sous-sol grâce à **des pompes à chaleur géothermiques**, qui extraient la chaleur en hiver et la dissipent en été. Cette technologie est idéale pour les caves, car elle permet de maintenir une température stable dans les salles de vieillissement, réduisant ainsi la consommation d'électricité pour la climatisation jusqu'à 50 % (FAO, 2020). À Bordeaux, le domaine viticole **Château Smith Haut Lafitte** combine la géothermie et la biomasse pour couvrir ses besoins thermiques, ce qui lui permet de réduire ses émissions de CO_2 de 180 tonnes par an (Bindi & Olesen, 2011).

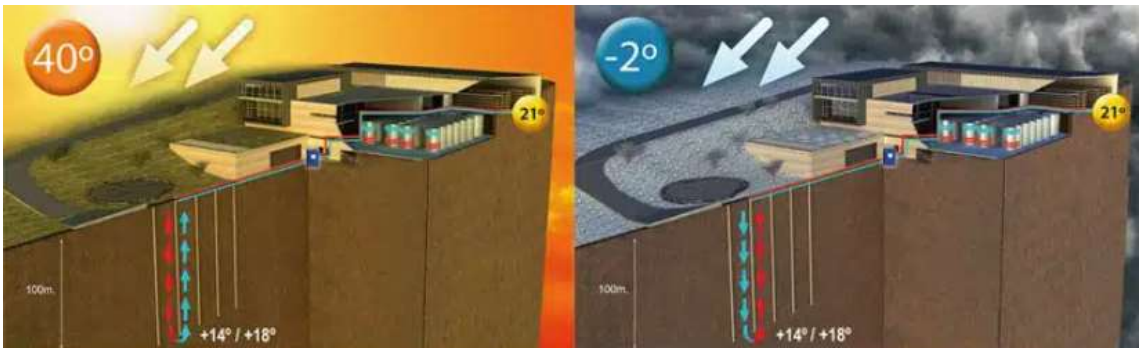

Figure 19. Installation géothermique au domaine viticole Château Smith Haut Lafitte Source : VitiViniCultura

Avantages :

- Haute efficacité énergétique (COP de 3 à 5 pour les pompes à chaleur géothermiques).
- Technologie silencieuse et peu encombrante.
- Réduction significative des émissions de CO_2 par rapport aux combustibles fossiles.
- Complémentarité avec d'autres énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire ou la biomasse, afin de diversifier la matrice énergétique.

Défis

- Besoin de logistique pour la collecte, le séchage et le stockage des déchets.
- Besoins spécifiques en machines pour la granulation ou le conditionnement du matériau.
- Variabilité saisonnière de la disponibilité de la biomasse, qui oblige à planifier l'accumulation et le stockage pour couvrir la demande annuelle.
- Émissions possibles de particules lors de la combustion, qui nécessitent des systèmes de filtrage et le respect des réglementations environnementales pour leur contrôle.

2.2. Planification et mise en œuvre des systèmes énergétiques dans les caves

La transition énergétique dans le secteur viticole ne se limite pas à l'intégration de technologies renouvelables, mais implique un processus complet de diagnostic, de planification, d'exécution et de suivi. Ce processus doit être adapté à la réalité spécifique

de chaque cave, en tenant compte de facteurs tels que la taille, l'emplacement, la capacité de production, le climat et le budget disponible. L'objectif est de maximiser l'efficacité énergétique et de réduire les émissions de gaz à effet de serre sans compromettre la qualité du vin, la viabilité opérationnelle ou la rentabilité de l'entreprise (Finger et al., 2019).

1. Diagnostic énergétique initial

La première étape consiste à réaliser un audit énergétique afin d'identifier les points critiques de consommation. Selon des études de l'OIV (2021) et de l'Institut pour la diversification et l'économie d'énergie (IDAE), dans une cave typique, les principales sources de consommation sont les suivantes :

- **Processus de vinification :** pompes, presses, systèmes de fermentation contrôlée.
- **Climatisation et réfrigération :** maintien de la température dans les cuves et les salles d'élevage (peut représenter jusqu'à 50 % de la consommation totale).
- **Éclairage et bureaux administratifs.**
- **Irrigation et pompage dans le vignoble.**

Un diagnostic approprié permet de calculer l'indice énergétique par litre de vin produit, de le comparer aux normes de l'industrie (benchmarking) et de définir des objectifs de réduction (IDAE, 2021).

2. Conception du plan énergétique

Une fois le profil de consommation identifié, un plan énergétique global est élaboré. Il doit inclure :

- **Définition des objectifs stratégiques :** réduction de la consommation de X % en 5 ans, neutralité carbone d'ici 2030, etc.
- **Sélection technologique optimale :** basée sur une analyse de faisabilité technique, climatique et économique.
- **Analyse du cycle de vie (ACV) :** pour estimer l'impact environnemental total des solutions proposées.

Il est recommandé d'appliquer des méthodologies telles que l'analyse multicritères (CMA) pour hiérarchiser les investissements (Pardo et al., 2019). Cette approche permet de pondérer des critères tels que le coût d'investissement, les économies attendues, l'impact environnemental, la facilité d'intégration et la durée de vie utile.

3. Mise en œuvre de technologies et de solutions hybrides

Dans la pratique, la plupart des caves optent pour **des combinaisons hybrides** qui intègrent diverses technologies renouvelables ainsi que des systèmes à haut rendement énergétique. Exemples :

- **Hybridation solaire + biomasse :** panneaux photovoltaïques pour couvrir la consommation d'électricité pendant la journée, biomasse pour le chauffage en hiver.
- **Géothermie + solaire thermique :** pour une climatisation stable dans les chambres de vieillissement et une réduction de la consommation électrique dans la réfrigération.
- **Systèmes de stockage d'énergie :** batteries au lithium ou technologies émergentes telles que les batteries à flux, pour améliorer l'autonomie et la gestion de la demande.

En Californie, la *Robert Mondavi Winery* a installé un système hybride combinant photovoltaïque (1 MW), batteries Tesla Powerpack et chaudières à biomasse, réduisant ainsi sa dépendance au réseau électrique de 35 % et réalisant des économies annuelles de plus de 300 000 dollars (IWCA, 2022).

4. Gestion numérique et automatisation

La transition énergétique dans la viticulture est étroitement liée à **la numérisation**. **Les plateformes de gestion** de l'énergie **(EMS)** permettent :

- De surveiller la consommation et la production en temps réel.
- De prévoir les pics de demande à l'aide d'algorithmes prédictifs.
- D'automatiser le fonctionnement des équipements, en optimisant le rapport production-consommation.

Un cas pionnier est celui de **SmartVitis** en Italie, qui intègre les données énergétiques, d'irrigation et climatiques pour planifier les opérations agricoles en fonction de la disponibilité des énergies renouvelables (Moriondo et al., 2020).

5. Financement et incitations

L'un des principaux défis pour la mise en œuvre de systèmes énergétiques durables est le **coût initial élevé**, qui peut varier de **50 000 à 500 000 euros**, selon la taille et la technologie choisie (Boraud et al., 2022). Pour surmonter cet obstacle, les mesures suivantes ont été mises en place :

- **Subventions publiques :** telles que l'aide du programme de développement rural (PDR) de l'UE et **les fonds du Green Deal**.
- **Modèles de financement innovants :**
    - Le **leasing énergétique** : l'entreprise fournisseur installe le système et le viticulteur paie une redevance mensuelle inférieure à sa facture d'énergie précédente.
    - **Contrats d'achat d'électricité (CAE) :** contrats à long terme pour l'achat d'énergie renouvelable sans investissement initial.

- **Systèmes coopératifs :** plusieurs caves se regroupent pour partager des installations et réduire les coûts unitaires.

6. Suivi et amélioration continue

La planification énergétique ne s'arrête pas à l'installation ; il doit exister un **système de suivi et d'évaluation continu**. Les indicateurs les plus couramment utilisés sont les suivants :

- **kWh d'énergie renouvelable produite/an.**
- **Réduction en tonnes d'équivalent CO_2.**
- **Coût énergétique par litre de vin produit.**

La tendance actuelle est à la certification selon des normes telles que **ISO 50001 (gestion de l'énergie)** et **ISO 14064 (empreinte carbone),** qui garantissent non seulement la conformité réglementaire, mais ajoutent également de la valeur à la commercialisation du vin (González-Fernández et al., 2022).

2.3. Stratégies de réduction de l'empreinte carbone dans la production viticole

La réduction de l'empreinte carbone dans l'industrie viticole est l'un des axes stratégiques les plus importants dans le cadre de **la transition énergétique et du développement durable**. Le secteur viticole, bien que moins émetteur que d'autres branches agro-industrielles, génère du CO_2 et d'autres gaz à effet de serre (GES) à toutes les étapes du cycle de production : du vignoble à la distribution du vin (Jones et al., 2010). Cet impact est principalement dû à :

- **La consommation d'énergie dans les caves :** climatisation, réfrigération, pompage, mise en bouteille.

- **L'utilisation d'engrais et de produits phytosanitaires :** qui émettent du N_2O et du CO_2.
- **Les opérations mécanisées :** travaux des champs, transport interne et distribution.
- **La gestion des sous-produits et des déchets :** fermentation, marc, pousses.
- **Emballage et logistique :** production de bouteilles en verre et transport international.

La stratégie visant à réduire cette empreinte implique une approche globale et systématique, avec des actions coordonnées dans les domaines de l'énergie, des processus de production, des matériaux et de la logistique.

1. Mesurer l'empreinte carbone comme point de départ

La réduction des émissions dans l'industrie viticole nécessite, dans un premier temps, une **quantification précise de l'empreinte carbone de** la cave et du vignoble. La mesure nous permet de connaître l'ampleur du problème, d'identifier les principales sources d'émissions et d'établir une **base de référence** à partir de laquelle évaluer les progrès futurs.

Il existe plusieurs méthodologies de mesure reconnues au niveau international :

- **ISO 14064** : norme internationale pour la quantification et la déclaration des émissions et des réductions de gaz à effet de serre (GES).
- **Protocole GHG** : méthodologie qui classe les émissions en trois catégories :
    - *Champ 1* : émissions directes (combustibles, processus propres).
    - *Champ 2* : émissions indirectes associées à l'énergie achetée.
    - *Champ 3* : émissions provenant de la chaîne de valeur (transport, emballage, distribution).
- **Équivalent CO_2 (CO_2e) :** indicateur permettant d'homogénéiser l'impact climatique des différents GES (CO_2, CH_4, N_2O).

En viticulture, la mesure doit couvrir à la fois la **phase agricole** (travail du sol, engrais, produits phytosanitaires, irrigation, machines) et la **phase vinicole** (énergie utilisée pour la fermentation, la climatisation, la mise en bouteille, le stockage) ainsi que la **phase logistique** (transport et distribution).

L'OIV (2021) et des organisations telles que **International Wineries for Climate Action (IWCA)** recommandent d'établir cette base de référence et de répéter l'évaluation **à chaque saison d'** , car les variations climatiques, de production et de consommation d'énergie ont une incidence significative sur les émissions.

Un exemple illustratif est celui de **Bodegas Torres (Espagne**), qui a calculé son empreinte carbone et déterminé que :

- **40 %** des émissions provenaient de la **fabrication des bouteilles en verre**,

- **24 %** de **la consommation d'énergie dans la cave**,
- **16 %** du **transport**.

Grâce à cette analyse, la cave a pu donner la priorité à des mesures visant à utiliser **des emballages plus légers et plus recyclables** et à **intégrer des énergies renouvelables**, ce qui lui a permis de réduire considérablement son empreinte ces dernières années (IWCA, 2022).

2. Optimisation énergétique et utilisation des énergies renouvelables

La consommation d'énergie représente entre 20 % et 40 % de l'empreinte totale (Pardo et al., 2019). Quelques stratégies clés :

- **Installation de panneaux solaires photovoltaïques** pour l'autoconsommation d'électricité, réduisant ainsi la dépendance au réseau et les émissions associées aux combustibles fossiles.
- **Utilisation de la biomasse viticole** (sarments, marcs) pour le chauffage et la production d'énergie thermique, réduisant ainsi l'utilisation de diesel ou de gaz naturel (Brunori et al., 2020).
- **Récupération de la chaleur** dans les processus de fermentation et de distillation afin de réduire l'utilisation des chaudières.
- **Éclairage LED et variateurs de fréquence** dans les pompes et les équipements, optimisant la consommation.

Jackson Family Wines (États-Unis) combine l'énergie solaire (6,7 MW installés) et l'efficacité de la réfrigération, ce qui lui permet de réduire de 33 % ses émissions dans la cave (IWCA, 2022).

3. Gestion des sols et séquestration du carbone

Le vignoble peut devenir un **puits de carbone** si des pratiques régénératrices favorisant la fixation du CO_2 dans le sol sont mises en œuvre :

- **Couverture végétale permanente :** augmentation de la matière organique et séquestration du carbone (Chirivella et al., 2021).
- **Réduction du travail du sol :** pour éviter le rejet de carbone par le sol.
- **Application de compost organique et de biochar :** améliore la fertilité et agit comme un réservoir de carbone stable.

Des études menées à Bordeaux et en Toscane indiquent que ces pratiques peuvent compenser entre 8 % et 12 % des émissions annuelles du vignoble (Brunori et al., 2020).

4. Réduction des émissions dans la logistique et le transport

Le transport du vin en bouteille vers les marchés internationaux est un facteur important dans l'empreinte carbone. Voici quelques solutions mises en œuvre :

- **Utilisation d'emballages légers** : réduire le poids des bouteilles de 100 g peut réduire les émissions de 6 % (OIV, 2021).
- **Alternatives au verre traditionnel** : bouteilles en PET recyclé, aluminium ou emballages Bag-in-Box pour les marchés locaux.
- **Optimisation des itinéraires et consolidation des chargements** : à l'aide d'outils numériques pour minimiser les trajets à vide.

Concha y Toro (Chili) a réduit le poids de ses bouteilles de 400 g, ce qui a permis de réduire de 13 % les émissions liées au transport (IWCA, 2022).

5. Économie circulaire et valorisation des sous-produits

Les déchets organiques, tels que le marc et les lies, peuvent être convertis en sources d'énergie ou en intrants pour d'autres secteurs :

- **Production de biogaz** par digestion anaérobie.
- **Extraction de polyphénols et d'antioxydants** pour l'industrie alimentaire et cosmétique.
- **Granulés de biomasse** pour le chauffage interne et la vente à des tiers.

Dans la Rioja, le projet **VINySOST** a développé des systèmes permettant de convertir les déchets viticoles en biomasse et en biofertilisants, réduisant ainsi l'empreinte totale de 20 % (AENOR, 2022).

6. Certification et communication de l'engagement climatique

De plus en plus de consommateurs apprécient les vins bénéficiant de certifications environnementales, telles que :

- **Carbon Neutral Wine** (certifié ISO 14064).
- **IWCA Gold Standard**.
- **Certification biologique et biodynamique**.

Yealands Estate (Nouvelle-Zélande) est devenu le premier domaine viticole à être certifié *« neutre en carbone »,* grâce à l'intégration de l'énergie solaire, de la biomasse et à la réduction du poids des bouteilles. Une communication transparente sur les étiquettes et les canaux numériques renforce la marque et permet d'accéder à des marchés haut de gamme sensibles à la durabilité.

2.4. Outils numériques pour le suivi de l'empreinte carbone et de la consommation énergétique

La transformation numérique appliquée à la viticulture ne se limite pas au suivi agronomique, mais joue un rôle essentiel dans **la gestion de la durabilité et de la transition énergétique**. La réduction **de l'empreinte carbone** et l'optimisation de la consommation d'énergie nécessitent **des systèmes de surveillance en temps réel**, des analyses prédictives et des plateformes intégrées qui transforment les données en décisions stratégiques (Wolfert et al., 2017 ; Verdouw et al., 2021). Cette section explore les outils et technologies les plus pertinents pour le contrôle et la surveillance de l'impact environnemental dans les vignobles et les caves.

1. Plateformes numériques de gestion de l'empreinte carbone

Les systèmes de surveillance des émissions permettent aux caves de calculer et de déclarer leur impact climatique conformément à des protocoles internationaux tels que **la norme ISO 14064**, **le protocole GHG** ou **la norme PAS 2050**. Ces outils se connectent aux données relatives à l'énergie, à la production et au transport afin de générer des rapports certifiés.

- **Exemples remarquables :**
    - **SustainaWine®** : une plateforme développée dans l'UE qui intègre des indicateurs d'empreinte carbone, hydrique et énergétique, et propose des recommandations automatiques pour réduire les émissions (CORDIS, 2021).
    - **Wine Carbon Calculator (California Sustainable Winegrowing Alliance) :** calcule les émissions depuis la production des intrants jusqu'à la mise en bouteille et la logistique, et propose des scénarios hypothétiques pour planifier des améliorations.
    - **IWCA Tool** : outil officiel de *l'International Wineries for Climate Action* pour la mesure et la vérification des émissions selon la méthodologie **Scope 1, 2 et 3** (IWCA, 2022).

Ces plateformes quantifient non seulement les émissions, mais intègrent également **des modules de simulation de scénarios** : par exemple, le calcul de l'impact du remplacement du verre traditionnel par des emballages légers ou de l'installation de panneaux photovoltaïques.

2. Capteurs IoT et surveillance en temps réel de la consommation d'énergie

Le déploiement de **l'Internet des objets (IoT)** dans les caves et les vignobles a révolutionné la capacité à mesurer et à optimiser la consommation d'énergie :

- **Capteurs de flux électriques et thermiques** : mesurent l'énergie consommée par les pompes, les systèmes de réfrigération, les presses et les équipements de climatisation.

- **Compteurs intelligents** connectés à des plateformes cloud : génèrent des alertes en cas de pics de consommation anormaux.
- **Intégration avec les systèmes de gestion technique des bâtiments (GTB)** pour optimiser le refroidissement dans les salles de fermentation et de stockage.

Le Château Larose-Trintaudon (France) a mis en place des capteurs IoT connectés à la plateforme **Wattsense**, ce qui lui a permis de réduire sa consommation d'électricité de 18 % grâce à des algorithmes d'optimisation de la climatisation (Commission européenne, 2022).

3. Jumeaux numériques et analyse prédictive

Le concept de jumeau **numérique** appliqué aux caves viticoles permet de simuler des scénarios énergétiques, d'optimiser les processus et d'évaluer l'impact des décisions stratégiques. Ces modèles intègrent des données en temps réel à des algorithmes prédictifs afin de :

- **Prévoir la consommation d'énergie** en fonction de la charge de travail (campagne de vendanges, mise en bouteille).
- **Simuler l'intégration de technologies renouvelables** et calculer le retour sur investissement (ROI) et la réduction des émissions.
- **Optimiser la programmation de l'irrigation et du pompage**, en la synchronisant avec les heures où le coût de l'énergie est le plus bas et l'empreinte carbone la plus faible (Verdouw et al., 2021).

Le projet **VitiGEOSS** (H2020) met en œuvre des jumeaux numériques pour intégrer l'énergie, l'eau et la logistique dans les exploitations viticoles du sud de l'Europe, en anticipant les scénarios climatiques et commerciaux (CORDIS, 2022).

4. Intelligence artificielle et mégadonnées pour l'efficacité énergétique

L'IA appliquée à la transition énergétique dans la viticulture se concentre sur :

- **La prévision de la demande énergétique** à l'aide de réseaux neuronaux qui combinent l'historique, la météo et la planification des processus.
- **L'analyse de la relation entre l'énergie, la production et la qualité** : corrélation des données pour identifier la consommation optimale par litre de vin produit.
- **La détection automatique des inefficacités** : des algorithmes qui comparent la consommation réelle à des références et proposent des mesures correctives.

Le logiciel EnergyMind® utilise l'apprentissage automatique pour identifier les schémas de gaspillage d'énergie dans les entrepôts, en ajustant le fonctionnement des équipements en temps réel.

5. La blockchain pour la traçabilité et la transparence énergétiques

De plus en plus de caves souhaitent **communiquer leur engagement en faveur du développement durable** à l'aide de données vérifiables. La technologie blockchain est utilisée pour :

- Certifier l'origine des énergies renouvelables utilisées dans le domaine viticole.
- Garantir la transparence de la chaîne de valeur.
- Fournir des données sur des étiquettes intelligentes qui indiquent l'empreinte carbone par bouteille.

Le projet **GreenChain Wine** en Italie intègre la blockchain pour certifier les énergies renouvelables et la réduction des émissions, en fournissant des données accessibles au consommateur grâce à des codes QR sur l'étiquette.

6. Intégration dans des plateformes de gestion intégrées (ERP agronomique)

Le défi ne consiste pas seulement à mesurer, mais aussi **à intégrer** les informations énergétiques au reste des processus de vinification :

- les systèmes ERP tels que **AgriWebb, Farm360 et Vite.net®** intègrent des modules consacrés à l'énergie et à la durabilité.
- Les principaux vignobles utilisent des tableaux de bord unifiés qui leur permettent de visualiser en temps réel la consommation d'énergie, les émissions, les indicateurs agronomiques et la situation financière.

Cela permet **de prendre des décisions basées sur des données** plutôt que sur l'intuition, en alignant l'efficacité énergétique sur la qualité et la rentabilité.

2.5. Coopérativisme énergétique dans les communautés viticoles

La décarbonisation de la viticulture ne dépend pas uniquement des pratiques agronomiques au niveau des champs. La consommation d'énergie pour l'irrigation, les machines, la réfrigération et les opérations des caves représente une part importante de l'empreinte carbone et des coûts de production du secteur. Dans ce contexte, le coopérativisme énergétique est apparu comme une voie stratégique pour les communautés viticoles qui cherchent à accroître leur autonomie énergétique, à réduire leurs coûts et à accélérer la transition vers les sources renouvelables.

Les coopératives énergétiques sont des initiatives collectives dans lesquelles les producteurs investissent conjointement dans des infrastructures d'énergie renouvelable — généralement des installations photovoltaïques — et partagent la production, les coûts et les bénéfices. Ce modèle s'aligne sur les politiques européennes de transition énergétique qui encouragent les projets énergétiques citoyens et communautaires comme instruments de systèmes énergétiques décentralisés et démocratiques (Commission européenne, 2019).



Figure 19. Membres de la coopérative solaire Westmill Source : Westmill Solar Co-operative

Dans le secteur viticole, où de nombreux producteurs opèrent dans des zones géographiquement concentrées et collaborent souvent déjà dans le cadre de coopératives agricoles traditionnelles, le coopérativisme énergétique représente une extension naturelle des structures collectives existantes.

Justification stratégique

L'énergie est devenue une variable stratégique pour les territoires viticoles. Au-delà d'un simple coût d'exploitation, l'électricité et le carburant influencent de plus en plus la compétitivité, l'exposition aux risques et la faisabilité de l'adaptation au changement climatique. Cela est particulièrement pertinent dans la viticulture, car la demande en énergie n'est pas constante : elle se concentre généralement sur des périodes spécifiques de l'année (irrigation en été ; refroidissement et transformation autour des vendanges et de la vinification), ce qui peut amplifier l'impact des pics de prix et des contraintes d'approvisionnement.

Dans les vignobles, la demande en électricité est souvent liée au pompage pour l'irrigation, en particulier dans les régions plus chaudes où la sécheresse et les vagues de chaleur ont rendu l'irrigation supplémentaire plus courante. Dans les caves, la demande se concentre sur le refroidissement et le contrôle de la température (gestion de la fermentation, stabilisation à froid, stockage), et elle est renforcée par les lignes d'embouteillage et de transformation, les systèmes d'air comprimé et les charges générales des installations (éclairage, systèmes de nettoyage, moteurs auxiliaires). À mesure que la numérisation progresse, la consommation d'énergie augmente également grâce aux systèmes de surveillance et de contrôle (équipements de connectivité, capteurs, automatisation, enregistrement de données et, parfois, dispositifs périphériques), ce qui accroît la valeur d'un approvisionnement électrique stable et prévisible.

Ce contexte est important car la rentabilité des activités à forte intensité énergétique est très sensible à la volatilité du marché. L'AIE a montré comment la crise

énergétique mondiale s'est traduite par des hausses de prix et une volatilité importantes (en particulier sur les marchés du gaz et de l'électricité), affectant directement l'accessibilité financière et la planification des entreprises. Une analyse plus récente de l'AIE met également en évidence des changements structurels sur les marchés de l'électricité (notamment des heures plus fréquentes avec des prix de gros négatifs dans certains systèmes européens depuis 2022), illustrant la manière dont la dynamique des prix de l'électricité devient plus complexe et moins prévisible, ce qui renforce la valeur des stratégies de couverture et d'autoconsommation.

Dans ce contexte, le coopérativisme énergétique (ou les modèles énergétiques coopératifs) offre une réponse pratique : il permet aux communautés viticoles d'investir collectivement dans la production d'énergie renouvelable, le plus souvent photovoltaïque, et de gérer l'énergie comme une ressource stratégique partagée. Lorsque les producteurs coopèrent, ils peuvent généralement bénéficier d'une meilleure conception des projets, d'économies d'échelle, d'un pouvoir de négociation plus fort et d'une expertise partagée dont les exploitations individuelles pourraient manquer. Au niveau territorial, cela peut également renforcer la cohésion en créant des actifs partagés, des économies partagées et une gouvernance partagée.

L'investissement collectif dans les énergies renouvelables peut offrir quatre avantages stratégiques :

- **Une réduction des coûts énergétiques à long terme,** en remplaçant une partie des achats sur le réseau par de l'électricité autoproduite pendant toute la durée de vie de l'installation.
- **Une plus grande stabilité des prix,** car une partie de l'approvisionnement énergétique est moins exposée aux fluctuations du marché (un avantage essentiel sur les marchés volatils).
- **Amélioration des performances environnementales,** grâce à la réduction des émissions opérationnelles et au soutien des rapports de durabilité et des certifications.
- **Une cohésion territoriale plus forte,** car le modèle repose sur une prise de décision et une création de valeur partagées plutôt que sur des investissements isolés.

Enfin, ces projets s'alignent fortement sur les objectifs climatiques et énergétiques de l'UE. La législation européenne a introduit et renforcé le rôle des communautés énergétiques, en particulier les « communautés énergétiques citoyennes » et les « communautés d'énergie renouvelable », en tant que pilier de la transition énergétique décentralisée. Cela est particulièrement pertinent pour les régions viticoles où la coopération existe déjà par le biais de coopératives, d'associations de producteurs ou de structures interprofessionnelles.

Modèles techniques et organisationnels

Le coopérativisme énergétique dans la viticulture peut être mis en œuvre à travers plusieurs configurations pratiques. Le modèle le plus efficace dépend des contraintes locales (toitures/terrains disponibles, raccordement au réseau, options réglementaires,

profil de la demande) et de la manière dont la communauté souhaite gérer les investissements et le partage des bénéfices.

1) Installations photovoltaïques partagées

Il s'agit de l'approche la plus courante et la plus facile à comprendre : les producteurs financent conjointement une installation photovoltaïque située sur les toits des caves coopératives, des installations communes, des terrains appropriés ou à proximité d'infrastructures d'irrigation. L'électricité peut être utilisée pour l'autoconsommation collective, attribuée aux membres selon une règle de distribution convenue, ou utilisée pour compenser une partie de la consommation du réseau de chaque membre.

Ce qui rend ce modèle viable, c'est la combinaison des éléments suivants : (a) une production solaire prévisible ; (b) une demande énergétique souvent importante pendant les heures de jour (pompage, équipement de refroidissement, opérations générales) ; et (c) la possibilité de répartir les bénéfices entre plusieurs membres. Dans la pratique, la coopérative doit définir : qui investit, comment les parts de participation sont attribuées, comment l'électricité est distribuée et comment les économies sont mesurées et communiquées.

Une référence opérationnelle pertinente est le guide pratique et la conception de services proposés par Som Energia pour les accords d'autoproduction collective (y compris la gestion du cadre d'autoconsommation collective). Bien qu'il ne soit pas spécifique au vin, il montre comment les acteurs coopératifs structurent les programmes collectifs et réduisent la complexité des transactions pour les participants.

2) Les communautés énergétiques dans le cadre de l'UE

Dans le cadre du paquet « Une énergie propre pour tous les Européens », l'UE a officiellement intégré les communautés énergétiques dans la législation, notamment à travers les concepts de communautés énergétiques citoyennes et de communautés d'énergie renouvelable, permettant aux acteurs locaux de produire, consommer, stocker et vendre collectivement de l'énergie renouvelable.

Pour les régions viticoles, cela est important car cela fournit un cadre politique pour des modèles qui vont au-delà du principe « une installation pour un site ». Les communautés énergétiques peuvent intégrer plusieurs utilisateurs et usages (caves, organismes d'irrigation, bâtiments municipaux, PME locales) et peuvent potentiellement combiner la production avec d'autres services tels que la surveillance partagée, la gestion de la demande et le stockage futur.

En Espagne, l'environnement institutionnel soutient de plus en plus le développement de l'énergie communautaire grâce à une planification nationale et à des programmes dédiés (par exemple, le cadre PNIEC et les lignes de soutien aux communautés énergétiques). Cela est important pour les vignobles, car les projets coopératifs améliorent souvent leur viabilité lorsqu'ils sont associés à un soutien public et à un cadre juridique clair.

3) Intégration de l'irrigation et de l'énergie

Dans de nombreuses régions viticoles méditerranéennes, l'irrigation est à la fois un outil d'adaptation au climat et un facteur de coût croissant. Les systèmes de pompage à énergie solaire, qu'ils soient déployés par une communauté d'irrigation ou une coopérative de producteurs, peuvent réduire la dépendance à l'électricité du réseau pendant les périodes de prix élevés et peuvent également réduire la dépendance au diesel là où elle existe encore.

Le pompage solaire collectif devient particulièrement intéressant lorsque les vignobles partagent des stations de pompage, des réservoirs ou des calendriers d'irrigation coordonnés. Comme la demande en irrigation atteint souvent son pic pendant les périodes ensoleillées, la production solaire et les besoins en pompage peuvent être bien alignés pendant de nombreux jours, ce qui améliore les taux d'autoconsommation (et donc les rendements économiques). L'approche coopérative aide également à gérer la complexité : au lieu que chaque viticulteur installe de petits systèmes, un actif partagé peut être conçu pour le profil de charge réel du territoire.

Avantages environnementaux et économiques

Les avantages des modèles coopératifs renouvelables doivent être présentés de manière à avoir du sens pour les viticulteurs et les caves : non pas comme des arguments abstraits en faveur du développement durable, mais comme des améliorations pratiques en matière de contrôle des coûts, de planification opérationnelle et de réduction des risques.

D'un point de vue environnemental, le remplacement de l'électricité du réseau par une autoconsommation renouvelable réduit les émissions opérationnelles et soutient les objectifs d'atténuation du changement climatique. L'AIE a souligné à plusieurs reprises le rôle des énergies renouvelables en tant que composante stabilisatrice et expansive de l'approvisionnement énergétique pendant la récente période de crise. Pour les caves viticoles, l'impact est particulièrement visible lorsque la production solaire coïncide avec la demande diurne (pompes, auxiliaires de refroidissement, charges de traitement), ce qui est courant pendant l'été et les vendanges.

D'un point de vue économique, l'effet le plus apprécié est souvent la prévisibilité. Les investissements coopératifs peuvent réduire la charge financière de chaque membre (investissements partagés plutôt que doublons), améliorer l'accès à l'expertise technique et renforcer l'accès aux incitations publiques ou aux programmes énergétiques communautaires dédiés. En Espagne, par exemple, l'IDAE propose des programmes d'incitation spécifiques pour les projets pilotes de communautés énergétiques, illustrant ainsi l'orientation politique vers des modèles collectifs.

La gouvernance coopérative permet également de répartir plus efficacement les risques. Au lieu qu'une seule exploitation agricole supporte toute l'incertitude liée aux performances technologiques, à la maintenance et aux changements réglementaires, la coopérative partage les responsabilités et peut professionnaliser les opérations (contrats de maintenance, routines de surveillance, conformité). Au fil du temps, cela tend à

renforcer la résilience locale, car les économies d'énergie restent sur le territoire et peuvent être réinvesties dans d'autres mesures d'adaptation (efficacité hydrique, santé des sols, outils numériques).

Exemple de réussite : les modèles énergétiques coopératifs dans les régions viticoles européennes

Le coopérativisme énergétique dans la viticulture n'est pas un phénomène national isolé, mais s'inscrit dans une transition européenne plus large vers des systèmes renouvelables décentralisés et communautaires. Dans plusieurs pays viticoles, les initiatives énergétiques coopératives et communautaires ont démontré que l'investissement collectif dans les infrastructures renouvelables peut réduire les coûts, accroître la résilience et renforcer la cohésion territoriale.

Bien que les cadres réglementaires diffèrent d'un État membre à l'autre, le principe sous-jacent reste le même : les acteurs locaux — notamment les caves, les associations de viticulteurs, les communautés d'irrigation et les municipalités — collaborent pour produire, gérer et consommer collectivement de l'énergie renouvelable dans le cadre du paquet « Énergie propre » de l'UE.

1. **France – Coopératives territoriales renouvelables dans les régions viticoles**

En France, les coopératives d'énergie renouvelable sont de plus en plus intégrées dans les stratégies de développement rural. Dans les régions viticoles telles que l'Occitanie et la Nouvelle-Aquitaine, des projets photovoltaïques collectifs ont été mis en œuvre par le biais de structures coopératives telles que les SCIC (Sociétés Coopératives d'Intérêt Collectif). Ces initiatives impliquent souvent des caves, des coopératives agricoles et des autorités locales qui investissent conjointement dans des installations solaires sur les toits des caves ou des bâtiments agricoles.

Le modèle français met en évidence la dimension territoriale du coopérativisme énergétique : les projets s'inscrivent dans le cadre de stratégies climatiques régionales plus larges, reliant l'autonomie énergétique au développement rural et à la durabilité agricole. Pour les vignobles confrontés à des besoins croissants en matière d'irrigation et de refroidissement, la production solaire partagée a contribué à stabiliser les coûts d'exploitation et à renforcer le positionnement environnemental sur des marchés d'exportation concurrentiels.

2. **Italie – Communautés d'énergie renouvelable dans les clusters agricoles**

L'Italie a activement développé des communautés d'énergie renouvelable (Comunità Energetiche Rinnovabili – CER), en particulier dans les territoires agroalimentaires. Dans les régions viticoles telles que l'Émilie-Romagne et la Vénétie, des projets pilotes ont permis de relier des caves, des consortiums d'irrigation et des installations agro-industrielles au sein de systèmes photovoltaïques partagés.

L'expérience italienne montre comment les clusters agricoles peuvent mettre en commun leurs toitures et leurs ressources foncières pour créer des systèmes énergétiques distribués qui profitent à de multiples acteurs. Il est important de noter que ces projets sont souvent soutenus par des incitations nationales et des procédures administratives simplifiées, ce qui illustre comment les directives européennes peuvent se traduire en une mise en œuvre concrète dans les zones rurales lorsqu'elles s'alignent sur les cadres politiques nationaux.

3. Allemagne – Des coopératives énergétiques bien établies dans les zones rurales

L'Allemagne possède l'une des traditions les plus anciennes en matière de coopératives énergétiques (Energiegenossenschaften). Dans les régions viticoles telles que le Bade-Wurtemberg et la Rhénanie-Palatinat, les coopératives ont financé l'installation de panneaux solaires sur les toits des caves et les bâtiments agricoles communs, en intégrant parfois des systèmes de surveillance de l'énergie et des solutions de stockage.

L'approche allemande met l'accent sur la transparence financière, la participation des membres et la planification à long terme. Elle illustre comment les modèles énergétiques coopératifs peuvent évoluer vers des plateformes d'innovation, combinant la production d'énergie renouvelable avec des outils de gestion numériques afin d'optimiser les modes de consommation et d'augmenter les taux d'autoconsommation.

4. Portugal – Solutions solaires dans les vignobles irrigués

Dans la vallée du Douro et l'Alentejo au Portugal, où la demande en irrigation est élevée et où la pression due à la sécheresse s'accentue, des systèmes collectifs de pompage solaire ont vu le jour comme réponse pratique à la hausse des coûts de l'électricité. Des associations agricoles et des coopératives locales ont investi dans des installations photovoltaïques partagées pour alimenter les infrastructures d'irrigation et les installations viticoles.

Ces projets démontrent l'alignement stratégique entre l'adaptation au changement climatique (gestion de l'eau) et la transition énergétique, en particulier dans les environnements méditerranéens où la disponibilité solaire et les besoins en irrigation coïncident de manière saisonnière.

5. Espagne – Coopératives énergétiques citoyennes et participation agricole

L'Espagne fournit également des exemples pertinents à travers des coopératives renouvelables citoyennes et des initiatives collectives d'autoconsommation. Dans plusieurs zones rurales, des systèmes photovoltaïques installés sur les toits des

coopératives viticoles ou des installations agricoles partagées ont permis aux membres de réduire leurs achats d'électricité sur le réseau et d'accroître leur autonomie énergétique.

Les expériences espagnoles montrent l'importance des organisations intermédiaires qui fournissent des conseils techniques, un soutien réglementaire et des structures de gouvernance. Ces acteurs réduisent la complexité administrative et aident les viticulteurs à s'y retrouver dans les cadres d'autoconsommation collective. Les stratégies nationales de promotion des communautés énergétiques citoyennes et de la transition énergétique rurale ont encore facilité ces développements.

Défis et exigences

Malgré son potentiel, le coopérativisme énergétique n'est pas « automatique ». Son succès dépend de la manière dont le projet est considéré à la fois comme un système technique et un système de gouvernance.

Une première **exigence est une gouvernance claire :** des règles transparentes en matière de participation, de parts d'investissement, de répartition des bénéfices, de processus décisionnels et de résolution des litiges. Cela est essentiel car les membres doivent avoir confiance dans le fait que la coopérative est gérée de manière équitable et professionnelle, en particulier lorsque les délais de récupération s'étendent sur plusieurs années.

Deuxièmement, **les projets nécessitent des capacités réglementaires et administratives.** Les communautés énergétiques existent dans des cadres juridiques qui définissent les droits et les obligations, et les projets coopératifs doivent gérer les autorisations, le raccordement au réseau, les structures contractuelles et la conformité. Les orientations et la législation de l'UE inscrivent explicitement les communautés énergétiques dans le cadre de la conception du marché de l'électricité et des règles d'autonomisation des consommateurs, renforçant ainsi la nécessité d'une gouvernance claire et d'une protection des consommateurs.

Troisièmement, il y a le **défi de la mobilisation du capital initial et de la faisabilité technique.** Même lorsque les coûts sont partagés, les coopératives doivent concevoir des projets bancables : estimations réalistes de la production, sélection rigoureuse des sites et planification financière prudente. Les programmes de soutien public peuvent améliorer la faisabilité, mais ne remplacent pas une conception rigoureuse du projet.

Quatrièmement, **les projets nécessitent une coordination à long terme**. Les actifs énergétiques nécessitent une maintenance, une surveillance, un suivi des performances et une prise de décision périodique (réinvestissement, mises à niveau, changements de membres). Sans une coordination soutenue, le système technique peut être sous-performant et la confiance des membres peut diminuer.

Enfin, **les coopératives doivent tenir compte de la saisonnalité et de la variabilité :** la production solaire est forte en été, mais la demande peut atteindre des pics différents en fonction des activités des caves (vendanges/transformation) et des calendriers d'irrigation. Certaines régions connaissent également une complexité croissante des modèles de prix de gros (y compris des heures de prix négatifs plus fréquentes), ce qui renforce l'intérêt d'une planification intelligente, d'une gestion de la

demande et, lorsque cela est possible, de stratégies de stockage ou d'intégration flexible au réseau.

3. Études de cas sur la viticulture durable

3.1. Exemples de réussite en matière de transition énergétique et de viticulture durable

La transition énergétique dans la viticulture n'est plus une tendance passagère, mais un axe stratégique qui définit la compétitivité et la durabilité du secteur viticole à l'échelle mondiale. De plus en plus de caves, conscientes de l'impact du changement climatique et des exigences réglementaires, adoptent les énergies renouvelables, les solutions numériques pour l'efficacité énergétique et les modèles circulaires visant à réduire leur empreinte carbone, à optimiser l'utilisation des ressources et à garantir leur viabilité à long terme (Organisation internationale de la vigne et du vin [OIV], 2021 ; IWCA, 2022).

Cette section analyse des cas réels en Europe, en Amérique et en Océanie, ainsi que l'intégration de **l'agrivoltaïque**, une technologie disruptive qui combine la production agricole et la production d'énergie solaire, redéfinissant ainsi la gestion des vignobles.

1. Espagne : leader en matière de décarbonisation et d'agrivoltaïque

Familia Torres, l'un des vignobles les plus renommés de Catalogne, s'est imposé comme un leader mondial dans la lutte contre le changement climatique dans le secteur viticole. Grâce à son programme **Torres & Earth**, lancé en 2008, l'entreprise a déployé une stratégie globale de décarbonisation reposant sur trois piliers : l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et la régénération écologique des sols. Parmi ses principales actions figure l'installation de **12 000 m^2 de panneaux photovoltaïques** capables de produire **2,5 GWh par an**, ce qui couvre environ **30 % des besoins en électricité** de ses caves. Cette production est complétée par l'utilisation de **chaudières à biomasse qui exploitent les sarments de vigne et les résidus de taille**, créant ainsi un système circulaire qui remplace les combustibles fossiles. En outre, Torres a investi dans **des projets de capture du CO_2 atmosphérique** et dans la régénération des sols dégradés grâce à des pratiques régénératrices, **ce qui lui a permis de réduire de 34 % ses émissions de gaz à effet de serre depuis 2008**. Cet engagement lui a valu d'être reconnu comme **membre Gold de l'International Wineries for Climate Action (IWCA)** et de réaliser une économie d'énergie annuelle estimée à **450 000 euros**.

En Espagne également, l'entreprise centenaire González Byass s'est fermement engagée en faveur des énergies propres dans ses caves de Jerez de la Frontera (Andalousie). Elle a installé **des toitures photovoltaïques d'une capacité de 2 MW**, qui couvrent une part importante de ses besoins en électricité. Parallèlement, elle a procédé à une automatisation complète de ses systèmes de climatisation et de ventilation, ce qui a permis **de réduire d'environ 40 % la consommation d'énergies fossiles** (Commission européenne, 2022). Ces mesures s'inscrivent dans le cadre de sa stratégie d'entreprise visant à atteindre la neutralité climatique d'ici 2040.

L'Espagne est également en train de s'imposer comme l'un des pays pionniers dans l'application de **l'agrovoltaïque dans les vignobles**, grâce à des projets promus par des entités telles que Repsol, le projet SMART PVwine et SOLARWINE. Ces initiatives combinent **des panneaux solaires bifaciaux et semi-transparents installés sur les**

vignobles, gérés par **des jumeaux numériques et des systèmes de contrôle intelligents**. Les objectifs sont ambitieux : **réduire l'impact climatique sur le vignoble, générer des revenus supplémentaires grâce à la vente de l'énergie excédentaire** et **valider des modèles agronomiques compatibles avec le changement climatique** (ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, 2023). Les résultats préliminaires indiquent des réductions notables du stress thermique et de la consommation d'eau dans les vignobles sous panneaux, ce qui ouvre la voie à un développement stratégique pour le pays.

2. France : neutralité carbone et technologie agricole de pointe

Le Château Larose-Trintaudon, situé dans la région de Bordeaux, est l'un des plus grands vignobles de la région avec **190 hectares** et a récemment obtenu **la certification de neutralité carbone**. Cette réussite a été rendue possible grâce à une approche innovante basée sur la **surveillance numérique de la consommation d'énergie à l'aide de capteurs IoT intégrés dans des plateformes BMS**, la souscription **d'électricité 100 % renouvelable par le biais de** contrats **PPA (Power Purchase Agreement)** et la production photovoltaïque sur site. De plus, les pratiques agroécologiques réduisent l'utilisation de produits chimiques et favorisent la biodiversité dans le vignoble. Ces mesures ont permis une **diminution de 18 % de la consommation totale d'énergie**, en grande partie grâce à l'utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle pour **l'optimisation** thermique **des installations**, en plus **de la compensation totale des émissions résiduelles par des projets forestiers certifiés**.

Dans la région du Languedoc, le domaine viticole Château Maris est devenu un exemple d'architecture écologique et d'efficacité énergétique. Son domaine, construit avec des matériaux naturels tels que **le chanvre et la chaux**, fonctionne entièrement à **l'énergie solaire,** à **la biomasse et** à **l'électricité provenant de sources renouvelables certifiées**. De plus, elle a obtenu **la certification** B **Lab (B-Corp)** pour ses performances environnementales, sociales et économiques, et a réussi à se positionner sur **les marchés haut de gamme où elle obtient jusqu'à 15 % de valeur ajoutée pour ses** vins à faible empreinte carbone (Wine Spectator, 2022).

La France a également pris des mesures décisives dans le domaine de l'agrivoltaïque. En Occitanie, le vignoble du Domaine de Nidolères participe au programme Sun'Agri, dans le cadre duquel **4,5 hectares de vignes sont cultivés sous des panneaux photovoltaïques dynamiques qui s'orientent automatiquement en fonction du rayonnement solaire et de l'humidité ambiante**. Les résultats sont impressionnants : **réduction de 70 % des besoins en irrigation**, augmentation des rendements de **20 à 60 %** et amélioration de la qualité des raisins grâce à une maturation plus lente et plus équilibrée (INRAE, 2022). La France devient ainsi une référence européenne en matière de viticulture résiliente au changement climatique.

3. Italie : énergie communautaire et coopératives agrivoltaïques

En Toscane, la cantina historique Gabbiano a entièrement modernisé son système énergétique en installant **1,8 MW de panneaux solaires** qui fournissent environ **70 % de**

sa consommation annuelle d'électricité. Cette production est combinée à **des pompes à chaleur géothermiques pour la climatisation**, ce qui a permis de réduire **de 45 % les coûts énergétiques liés à la température des installations.** Grâce à ces mesures, la cave a réussi à éviter l'émission d'environ **450 tonnes de CO_2 chaque année** et a récupéré son investissement en seulement cinq ans, grâce aux subventions du Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR).

Plus au nord, le Consorzio Vini del Trentino regroupe **plus de 3 000 viticulteurs du Trentin-Haut-Adige** et est devenu un exemple de la manière dont la coopération peut accélérer la transition énergétique dans les zones rurales. Le consortium a encouragé l'installation **de chaudières collectives à biomasse qui réutilisent le marc et les sarments de vigne**, ce qui a permis à l' de réduire **ses coûts énergétiques de 30 %** tout en **bouclant le cycle des déchets agricoles**, transformant ainsi les déchets en énergie propre (Commission européenne, 2021).

L'Italie développe également des projets agrivoltaïques communautaires. L'un des plus emblématiques est le projet **Vigna Agrivoltaica di Comunità – La Svolta**, dans les Pouilles, où **7 770 panneaux à couche mince d'une puissance de 970 kW ont été installés sur les vignobles**. Ce système a permis de **retarder la récolte de 3 à 4 semaines**, favorisant une **maturation plus lente et plus équilibrée**, tout en réduisant le **stress hydrique des plantes de 20 %.** Les raisins obtenus présentent **une acidité plus élevée et une concentration en sucres plus faible**, ce qui permet d'obtenir **des vins plus frais adaptés aux vins mousseux**, ouvrant ainsi de nouvelles opportunités commerciales dans un contexte de réchauffement climatique.

4. Chili : jumeaux numériques et efficacité énergétique à grande échelle

La multinationale Concha y Toro, leader de l'industrie viticole en Amérique latine, a développé un **plan global de durabilité énergétique** qui combine production d'énergie renouvelable, numérisation et efficacité. L'entreprise a installé **des parcs solaires à Maule et Colchagua capables de produire 3 GWh/an**, et a remplacé ses anciennes chaudières par **des systèmes à biomasse qui exploitent les sous-produits agricoles**. En outre, elle a mis en place un **jumeau numérique qui modélise en temps réel le comportement énergétique et hydrique de ses usines de production**, ce qui permet d'optimiser la consommation et de planifier avec précision les opérations. Elle a ainsi réussi **à réduire de 10 % la consommation d'électricité par litre de vin produit et de 30 % les émissions indirectes de scope 2,** ce qui lui a valu d'obtenir le **label d'efficacité énergétique du gouvernement chilien** (2021). Cette approche pionnière est reprise par d'autres caves du pays. **5. États-Unis : Jackson Family Wines et Smart Solar Energy**

5. États-Unis : énergie solaire intelligente et stockage distribué

En Californie, Jackson Family Wines a porté l'efficacité énergétique à un autre niveau en intégrant des technologies de prévision, de production d'énergie renouvelable et de stockage intelligent. L'entreprise a installé 12 MW de panneaux photovoltaïques, qui couvrent 60 % de ses besoins énergétiques pendant les périodes de pointe (vendanges), réduisant ainsi considérablement sa dépendance au réseau électrique. Cette capacité est

complétée par un système de batteries Tesla Powerpack qui stocke l'énergie pendant les heures creuses et la libère pendant les périodes de forte demande, tandis que des algorithmes d'intelligence artificielle ajustent dynamiquement les charges des équipements industriels. Ces innovations ont permis une réduction de 12 000 tonnes de CO_2 par an et des économies de 2,5 millions de dollars par an, atteignant ainsi avant l'heure l'objectif de neutralité carbone fixé par l'entreprise pour 2030 (IWCA, 2022).

3.2. Analyse comparative des modèles durables en viticulture

L'analyse comparative des différents modèles de durabilité mis en œuvre dans la viticulture nous permet de comprendre quelles sont les stratégies les plus efficaces en termes de **coût, d'impact environnemental, de retour sur investissement (ROI)** et **d'acceptation sociale**. Cette section présente les principales **approches adoptées par des caves de renommée internationale**, en comparant leurs caractéristiques clés : **technologie appliquée, investissement initial, économies, réduction des émissions et avantages connexes**.

1. Énergie photovoltaïque vs biomasse : impact et viabilité

L'énergie solaire photovoltaïque est la technologie la plus répandue dans les caves, grâce au fort ensoleillement des régions viticoles. Exemple :

- **Jackson Family Wines (États-Unis)** : 12 MW installés, investissement estimé à 14 millions de dollars, avec des économies annuelles de 2,5 millions de dollars et une réduction de **12 000 tonnes de CO_2/an** (IWCA, 2022).
- **Cantina Gabbiano (Italie) :** 1,8 MW installés, retour sur investissement en 5 ans, production de 70 % des besoins énergétiques (Commission européenne, 2021).

En revanche, **la biomasse viticole** tire parti des sous-produits tels que les sarments, les pépins et le marc, ce qui réduit les coûts d'élimination et boucle le cycle circulaire. Exemples :

- **Torres (Espagne) :** chaudières à biomasse qui couvrent le chauffage des caves, réduisant ainsi **de 200 tonnes les émissions de CO_2 par an**.
- **Consorzio Vini del Trentino** : modèle coopératif qui réduit les factures énergétiques de **30 %.**

Conclusion comparative :

- **Le photovoltaïque** a un coût initial élevé mais un retour sur investissement plus rapide (5 à 7 ans), tandis que la biomasse est plus accessible et offre des avantages supplémentaires dans l'économie circulaire.
- Dans les régions où les déchets sont abondants et où le rayonnement solaire est moins important, la biomasse est plus efficace ; dans les régions ensoleillées, le photovoltaïque domine.

2. Systèmes hybrides : combinaison de l'énergie solaire + géothermique + stockage

Les systèmes hybrides intègrent plusieurs sources pour stabiliser l'approvisionnement. Exemple :

- **Le Château Maris (France)** combine l'énergie solaire, la biomasse et le stockage thermique, atteignant **une autonomie énergétique de 95 %.**
- Intégration de **batteries Tesla Powerpack en Californie**, qui permettent d'équilibrer les pics de consommation et de réduire la dépendance au réseau électrique.

Résultats :

- Couverture constante, même pendant les périodes de faible ensoleillement.
- Coût initial élevé (investissement supérieur à 500 000 € dans les caves de taille moyenne) mais réduction totale des dépenses énergétiques.

3. L'intelligence artificielle (IA) au service de l'efficacité énergétique

La numérisation appliquée à la gestion de l'énergie représente un bond en avant qualitatif en matière de durabilité. Exemples :

- **Concha y Toro (Chili)** utilise **des jumeaux numériques** pour simuler des scénarios énergétiques, ce qui lui permet de **réduire de 10 % sa consommation d'électricité par litre produit**.
- **Torres (Espagne)** applique **l'IA prédictive** pour gérer le refroidissement des cuves, optimisant ainsi l'utilisation des énergies renouvelables.

Avantages par rapport aux modèles traditionnels :

- Économies d'énergie supplémentaires de **10 à 15 %** sans investissements importants en matériel.
- Amélioration de la traçabilité et de la prise de décision pour éviter les dépassements de coûts.

4. Certifications et valeur commerciale : effet sur le prix du vin

L'impact économique de la durabilité ne se mesure pas seulement en termes d'économies d'énergie, mais aussi en termes de **valeur ajoutée pour le consommateur** :

- Les caves certifiées « **carbone neutre** » (par exemple, Château Larose-Trintaudon) ont réussi à positionner leurs vins avec une **prime de 10 à 15 %** sur les marchés haut de gamme (Wine Spectator, 2022).
- Des programmes tels que **B-Corp** ou **IWCA Gold Member** facilitent l'entrée dans les chaînes internationales et renforcent la réputation de la marque.

Co-funded by the European Union
Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

5. Comparaison du retour sur investissement (ROI) et des avantages environnementaux

Tableau 1. Élaboration des auteurs sur la base de l'IWCA (2022), Torres (2021) et la Commission européenne (2021).

Technologie	**Investissement initial (€)**	**ROI**	**Réduction des émissions de CO_2/an**	**Autres avantages**
Photovoltaïque (1 MW)	700 000 – 1 000 000	5-7 ans	1 000 – 1 500 t	Autonomie partielle, image écologique
Biomasse (chaudière 500 kW)	250 000 – 400 000	3-4 ans	200 – 300 t	Valorisation des déchets
Géothermie (cave moyenne)	150 000 – 300 000	4 à 6 ans	150 – 250 t	Stabilité thermique
IA pour l'efficacité	50 000 – 100 000	2 ans	50 – 100 t	Optimisation numérique

Conclusion de l'analyse comparative

Le modèle le plus rentable pour les petites et moyennes exploitations viticoles est celui **qui combine le photovoltaïque et la biomasse**, complété par **l'intelligence artificielle pour la gestion de l'énergie**. Les grandes exploitations viticoles peuvent intégrer **le stockage et la géothermie**, atteignant ainsi la neutralité carbone. La clé réside dans la **flexibilité du système et l'accès aux aides publiques**, qui peuvent réduire l'investissement de **40 à 60 %.**

3.3. Impact économique et environnemental de la transition énergétique sur les caves viticoles

La transition énergétique dans la viticulture et la vinification implique non seulement un changement technologique, mais aussi une **profonde transformation de la structure des coûts, du positionnement commercial et de l'empreinte environnementale du** secteur. Cette section aborde les principaux impacts sous un double angle : **économique (coûts, économies, retour sur investissement)** et **environnemental (réduction des émissions, efficacité des ressources),** sur la base d'études récentes et d'études de cas.

1. Impact économique : coûts et retour sur investissement (ROI)

L'adoption de technologies renouvelables et l'efficacité énergétique représentent un **défi financier initial**, en particulier pour les petits vignobles, où l'investissement peut varier de **50 000 € à plus de 1 000 000** €, selon l'échelle et les technologies intégrées (Commission européenne, 2021).

Répartition estimée des investissements par technologie

- **Panneaux solaires photovoltaïques (1 MW) :** 700 000 - 1 000 000 €
- **Chaudières à biomasse (500 kW) :** 250 000 – 400 000 €
- **Géothermie pour la climatisation :** 150 000 à 300 000 €
- **Stockage électrique (batteries) :** 200 000 – 350 000 €
- **IA et systèmes de gestion de l'énergie :** 50 000 à 100 000 €

Le retour sur investissement (ROI) dépend de la combinaison technologique, de la consommation d'énergie et des subventions disponibles. Selon **International Wineries for Climate Action (IWCA, 2022)** et **Torres (2021) :**

- **Photovoltaïque :** retour sur investissement en **5 à 7 ans** grâce à l'autoconsommation et à la vente des excédents.
- **Biomasse :** retour sur investissement en **3 à 4 ans**, en plus de la réduction des coûts de gestion des déchets.
- **IA et optimisation énergétique :** retour sur investissement rapide, en **1 à 2 ans**, grâce à une réduction de la consommation d'électricité (10 à 15 %).

Les caves qui combinent plusieurs technologies enregistrent **des économies de 25 à 35 % sur leurs factures d'électricité** et une **réduction de 30 % de leurs coûts énergétiques globaux**, ce qui leur permet de libérer des capitaux pour l'innovation et le marketing (García et al., 2022).

2. Impact environnemental : réduction de l'empreinte carbone

La production traditionnelle de vin a une empreinte carbone estimée entre **1,5 et 2,0 kg de CO_2 par bouteille de vin** (Delmotte et al., 2020). La mise en œuvre d'énergies renouvelables peut réduire considérablement ces émissions :

- **Photovoltaïque :** -40 % de l'empreinte énergétique électrique.
- **Biomasse :** -15 à 20 % supplémentaires en remplacement des combustibles fossiles.
- **Systèmes hybrides (solaire + biomasse + stockage) :** -70 à 80 % des émissions énergétiques.
- **IA et numérisation :** réduction indirecte de 10 % grâce à l'optimisation des processus.

Exemple quantitatif

- Une cave viticole avec **une production de 500 000 bouteilles/an** et une consommation électrique de **1,2 GWh/an** :
    - Avant : émissions de 550 t CO_2/an liées à l'énergie.

- Après intégration du photovoltaïque (couverture à 70 %) : réduction de 385 t de CO_2/an.
- Intégration de la biomasse pour le chauffage : réduction supplémentaire de 90 t CO_2/an.
- Total : réduction de plus de **85 %** de l'empreinte énergétique.

Ce niveau d'atténuation permet aux caves de se doter de **certifications environnementales (Carbon Neutral, ISO 14001),** ce qui renforce leur compétitivité et leur accès aux marchés haut de gamme (Wine Spectator, 2022).

3. Impact sur la compétitivité et la valeur commerciale

La durabilité énergétique permet non seulement de réduire les coûts et les émissions, mais aussi **de générer une valeur économique directe** :

- **Prix premium :** les vins certifiés durables se vendent **10 à 20 % plus cher**, en particulier sur les marchés américains et nord-européens (Wine Intelligence, 2021).
- **Attirer les investissements et les financements verts :** des fonds tels que **NextGeneration EU** couvrent jusqu'à **40 à 60 % de l'investissement initial**, accélérant ainsi la transition (Commission européenne, 2021).
- **Fidélisation des consommateurs :** 66 % des acheteurs de vin dans l'UE considèrent la durabilité comme un critère d'achat essentiel (OIV, 2022).

4. Obstacles économiques et solutions

- **Coûts initiaux élevés :** solution : **modèles Energy SaaS** (Energy as a Service) et **PPA (Power Purchase Agreements)**.
- **Accès inégal au financement :** les coopératives et les clusters viticoles peuvent négocier des achats collectifs afin de réduire les coûts de **20 à 30 %.**
- **Manque de données réelles sur le rendement : systèmes de surveillance continue (IoT + IA)** qui génèrent des rapports financiers et environnementaux pour justifier les investissements.

Tableau récapitulatif de l'impact économique et environnemental

Mesure	**Réduction des émissions de CO_2**	**Économies annuelles (%)**	**Retour sur investissement estimé**
Photovoltaïque	40	20-25	5-7 ans
Biomasse	15-20	15	3-4 ans

Mesure	Réduction des émissions de CO_2	Économies annuelles (%)	Retour sur investissement estimé
IA et numérisation	10 % (indirect)	8-12	1 à 2 ans
Systèmes hybrides	70-80	30-40	7 à 10 ans

Références

- Abad, J., Marqués, M. J., & Álvaro-Fuentes, J. (2021). Conservation des sols dans les vignobles : une revue mondiale. Agronomie pour le développement durable, 41(45), 1–22.

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Évapotranspiration des cultures : lignes directrices pour le calcul des besoins en eau des cultures (Document n° 56 de la FAO sur l'irrigation et le drainage). FAO. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

- Almeida, W. S., Paredes, P., Basto, J., Pôças, I., Pacheco, C. A., & Paço, T. A. (2024). Estimation de l'évapotranspiration des vignes pluviales en combinant la télédétection et le modèle d'équilibre hydrique du sol SIMDualKc. Water, 16(18), 2567. https://doi.org/10.3390/w16182567

- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). Approches technologiques de l'agriculture durable à la croisée des chemins : une perspective agroécologique. Sustainability, 9(3), 349. https://doi.org/10.3390/su9030349

- Bàrberi, P., Burgio, G., Dinelli, G., Moonen, A. C., Otto, S., Vazzana, C., & Zanin, G. (2010). Biodiversité fonctionnelle dans le paysage agricole : relations entre les mauvaises herbes et la faune arthropode. Weed Research, 50, 388–401. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00798.x

- Bavaresco, L., Gatti, M., Fregoni, M., & Pezzutto, S. (2016). Porte-greffes de vigne : effets sur la viticulture et l'environnement. Acta Horticulturae, 1136, 41–50. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1136.6

- Biddoccu, M., Ferraris, S., Pitacco, A., Cavallo, E., & Comolli, R. (2016). Mesures des précipitations et du ruissellement dans les vignobles en pente : évaluation des mesures de contrôle des inondations et de l'érosion des sols. Australian Journal of Grape and Wine Research, 22(1), 54–67. https://doi.org/10.1111/ajgw.12173

- Bindi, M., & Olesen, J. E. (2011). Les réponses de l'agriculture européenne au changement climatique. Regional Environmental Change, 11(1), S151–S158. https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x

- Bordelon, B. P., Bates, T. R., & Morris, J. R. (2020). La gestion des sols et son impact sur la croissance de la vigne et la qualité des fruits. American Journal of Enology and Viticulture, 71(2), 123–134. https://doi.org/10.5344/ajev.2020.19054

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

- Brunori, G., Cerruti, A., & Corsi, S. (2020). Bilan carbone et potentiel d'atténuation du secteur viticole. Journal of Cleaner Production, 271, 122645. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122645

- Celette, F., Gaudin, R., & Gary, C. (2008). Changements spatiaux et temporels du régime hydrique d'un vignoble méditerranéen suite à l'adoption de cultures de couverture. European Journal of Agronomy, 29, 153–162. https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.04.007

- Celette, F., Gaudin, R., & Gary, C. (2009). Compétition pour l'azote dans un système de culture intercalaire non fertilisé. European Journal of Agronomy, 30, 41–51. https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.07.003

- Delmotte, F., Corio-Costet, M. F., & Delière, L. (2020). Gestion intégrée des maladies et réduction de l'utilisation des pesticides en viticulture. Science of the Total Environment, 731, 139269. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139269

- Er-Raki, S. (2024). Utilisation d'AquaCrop pour l'irrigation et l'évaluation de la productivité hydrique des raisins de table. E3S Web of Conferences, 489, 04011. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448904011

- Commission européenne. (2021a). Stratégie de l'UE pour les sols à l'horizon 2030. https://environment.ec.europa.eu/publications/eu-soil-strategy-2030_en

- Commission européenne. (2021b). Transition verte dans les caves de l'UE : énergies renouvelables et durabilité. Office des publications de l'Union européenne.

- Commission européenne. (2022). Les technologies numériques au service de l'efficacité énergétique dans le secteur vitivinicole. EU Science Hub.

- FAO. (2017). L'avenir de l'alimentation et de l'agriculture – Tendances et défis. https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf

- Gambetta, G. A., Herrera, J. C., Dayer, S., Feng, Q., Hochberg, U., & Castellarin, S. D. (2020). La physiologie du stress hydrique chez la vigne. Journal of Experimental Botany, 71(16), 4658–4676. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa245

- García, L., Miñarro, M., Martínez-Sastre, R., & García, D. (2018). Couvre-sols et biodiversité dans les vignobles méditerranéens. Agriculture, Ecosystems & Environment, 267, 100–111. https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.017

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

- García, M., Hernández, L., & Santesteban, L. G. (2022). Les jumeaux numériques en viticulture. Agronomie, 12(4), 856. https://doi.org/10.3390/agronomy12040856

- Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J. F., & Ruiz-Sinoga, J. D. (2016). Effets des traitements de la couche arable dans un climat méditerranéen sec. Solid Earth, 7(5), 1479–1489. https://doi.org/10.5194/se-7-1479-2016

- International Wineries for Climate Action (IWCA). (2022). Meilleures pratiques pour la décarbonisation dans la production viticole [Rapport technique].

- Intrigliolo, D. S., & Castel, J. R. (2011). Effets interactifs de l'irrigation déficitaire et de l'éclaircissage des pousses et des grappes. Irrigation Science, 29(6), 443–452. https://doi.org/10.1007/s00271-010-0258-y

- Ismail, S. M. (2025). Biofertilisants et amélioration du carbone dans les sols des vignobles méditerranéens. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 25(3), 1023–1037. https://doi.org/10.1007/s42729-025-01234-9

- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2010). Changement climatique et qualité mondiale du vin. Changement climatique, 73(3), 319–343. https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2

- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls. Journal of Experimental Botany, 55(407), 2427–2436. https://doi.org/10.1093/jxb/erh213

- Kumar, P. (2022). Application of sap flow sensors for irrigation scheduling. Frontiers in Plant Science, 13, 1021387. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1021387

- Lal, R. (2004). Impacts de la séquestration du carbone dans le sol sur le changement climatique mondial. Science, 304, 1623-1627.

- Lal, R. (2020). Matière organique du sol et rétention d'eau. Agronomy Journal, 112(5), 3755–3768. https://doi.org/10.1002/agj2.20282

- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Le biochar pour la gestion environnementale (2e éd.). Routledge.

- López-Vicente, M., Álvarez, S., & Marqués, M. J. (2020). Conservation des sols et de l'eau dans les vignobles en pente. Agricultural Water Management, 240, 106267. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106267

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

- Lucchetta, M., Rossi, F., & Rombolà, A. D. (2025). Évaluation du compost issu des résidus de taille et de vinification. Frontiers in Sustainable Food Systems, 9, 1504761. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1504761

- Malvoni, M., Congedo, P., & Laforgia, D. (2017). Analyse de la consommation d'énergie : étude de cas d'un domaine viticole italien. Energy Procedia, 126, 227–233. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.144

- Martínez-Casasnovas, J. A., Escolà, A., & Ramos, M. C. (2012). Zones de gestion spécifiques au site dans la viticulture de précision. Precision Agriculture, 13, 622–638.

- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J. M., Pou, A., Fuentes, S., & Bota, J. (2015). Amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les vignobles. Agronomie pour le développement durable, 35, 499-517. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0280-z

- Mirás-Avalos, J. M., Trigo-Córdoba, E., & Buesa, I. (2021). Optimisation de la gestion de l'eau dans les vignobles. Eau, 13(6), 746. https://doi.org/10.3390/w13060746

- Morlat, R., & Symoneaux, R. (2008). Effet à long terme des systèmes de gestion des sols. Vitis, 47(4), 201–208.

- Pardo, G., Moral, R., Aguilera, E., & del Prado, A. (2019). Émissions de GES et potentiel d'atténuation dans l'agriculture espagnole. Environmental Science & Policy, 94, 119–129. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.020

- Pattara, C., Raggi, A., & Cichelli, A. (2012). Analyse du cycle de vie et empreinte carbone dans la chaîne d'approvisionnement du vin. Environmental Management, 49(6), 1247–1258. https://doi.org/10.1007/s00267-012-9844-3

- Ripoche, A., Metay, A., Celette, F., & Gary, C. (2011). Changement dans la gestion de la surface du sol dans les vignobles. Plant and Soil, 339, 259–271. https://doi.org/10.1007/s11104-010-0573-1

- Ruiz-Colmenero, M., Bienes, R., & Marqués, M. J. (2013). Dilemmes liés à la conservation des sols et de l'eau dans les vignobles en pente. Soil and Tillage Research, 126, 111–118. https://doi.org/10.1016/j.still.2012.09.006

- SARE. (2022). Managing cover crops profitably (3e éd.). USDA. https://www.sare.org/resources/managing-cover-crops-profitably/

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

- Van Leeuwen, C., & Darriet, P. (2016). L'impact du changement climatique sur la viticulture et la qualité du vin. Journal of Wine Economics, 11(1), 150–167. https://doi.org/10.1017/jwe.2016.7

- Van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., de Rességuier, L., & Schultz, H. (2019). Impact du changement climatique sur la viticulture. Bulletin de l'OIV, 92, 1–27.
- Wine Intelligence. (2021). Tendances en matière de vins haut de gamme et de durabilité : aperçu des consommateurs mondiaux. Série de recherches Wine Intelligence.

- Wine Spectator. (2022). Vins durables : impact sur le marché et préférences des consommateurs. Rapport Wine Spectator Insights.

- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Le big data dans l'agriculture intelligente : une revue. Agricultural Systems, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

Annexe I – Questions examinées

Bloc 1 : Pratiques écologiques en viticulture

1. Il explique le rôle de la matière organique dans la fertilité des sols et la capacité de rétention d'eau dans les vignobles.
2. Quels sont les effets du labour intensif sur la structure du sol et la biodiversité microbienne ?
3. Comparez les avantages et les inconvénients de l'utilisation de couvertures végétales par rapport aux sols nus dans les climats méditerranéens.
4. Comment la biodiversité fonctionnelle contribue-t-elle à la lutte biologique contre les ravageurs dans les vignobles ?
5. Il cite trois pratiques qui augmentent la biodiversité fonctionnelle dans un vignoble et décrit comment elles favorisent sa résilience.

Bloc 2 : Efficacité hydrique

1. Il définit le concept de déficit hydrique contrôlé (RDI) et ses effets sur la qualité du vin.
2. Il explique les avantages des capteurs d'humidité du sol par rapport à la programmation fixe de l'irrigation.
3. Il décrit brièvement le modèle AquaCrop et son utilité en viticulture.
4. Quelle est la contribution des réseaux de capteurs basés sur l'Internet des objets (IoT) à la gestion de l'eau ?
5. Il établit un lien entre les économies d'eau et les économies d'énergie dans la viticulture.

Bloc 3 : Biodiversité dans le vignoble

1. Il définit le concept de biodiversité fonctionnelle et son importance dans la viticulture durable.
2. Comment la monoculture intensive influence-t-elle l'apparition de ravageurs et de maladies ?
3. Expliquez le rôle des haies et des corridors écologiques dans la conservation de la faune auxiliaire.
4. Il mentionne trois avantages écologiques directs de la mise en place de couvertures végétales dans les vignobles.
5. Quels obstacles socio-économiques peuvent entraver l'adoption de pratiques favorisant la biodiversité ?

Co-funded by the European Union
Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

Bloc 4 : Utilisation durable de l'énergie

1. Quel est le pourcentage approximatif des coûts énergétiques dans la viticulture conventionnelle selon l'Organisation internationale de la vigne et du vin (OIV) ?
2. Il explique deux technologies qui améliorent l'efficacité énergétique dans l'irrigation des vignobles.
3. Il décrit le fonctionnement de base d'une installation photovoltaïque et ses principaux avantages dans la viticulture.
4. En quoi un audit énergétique contribue-t-il à la transition d'un vignoble vers les énergies renouvelables ?
5. Définissez un système énergétique hybride et donnez un exemple d'application dans les caves.

Bloc 5 : Transition énergétique dans l'industrie viticole

1. Il identifie les étapes du cycle viticole qui concentrent le plus de consommation d'énergie et d'émissions de GES.
2. Il explique le concept d'empreinte carbone et la différence entre les scopes 1, 2 et 3 selon le GHG Protocol.
3. Il mentionne trois stratégies pour réduire l'empreinte carbone d'un domaine viticole et son impact environnemental.
4. Quels sont les avantages de la certification International Wineries for Climate Action (IWCA) ?
5. Il définit ce qu'est l'agrivoltaïque et décrit comment il peut être appliqué dans les vignobles.

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

Annexe II – Activité didactique : « Concevoir un vignoble durable »

Vous ferez partie de l'équipe technique d'un domaine viticole qui souhaite transformer son vignoble conventionnel en un système de production durable, efficace et résilient au changement climatique. Pour ce faire, vous devez concevoir un plan de transition agroécologique et énergétique, en appliquant les connaissances acquises dans le module sur les sols, l'eau, la biodiversité, l'énergie et l'atténuation du changement climatique.

Informations initiales sur le vignoble fictif

- **Situation :** zone intérieure avec un climat méditerranéen semi-aride
- **Superficie :** 25 hectares de vignobles en treillis
- **Sol :** texture sableuse-limoneuse, faible teneur en matière organique, signes d'érosion
- **Gestion actuelle :** labour intensif, sans couverture végétale, faune auxiliaire rare
- **Eau :** irrigation par aspersion, sans capteurs, consommation élevée et inefficace
- **Fertilité :** utilisation d'engrais chimiques et phytosanitaires synthétiques
- **Énergie :** dépendance totale à l'électricité du réseau et au diesel pour les machines
- **Émissions :** émissions élevées de gaz à effet de serre (GES)
- **Coûts :** factures énergétiques en hausse et faible efficacité des ressources

Votre mission consiste à élaborer un plan de transition durable pour le vignoble, qui doit inclure les sections suivantes :

1. Gestion et fertilité des sols

- Proposer des stratégies pour améliorer la santé et la fertilité des sols (par exemple, couverture végétale, réduction du labour, compost ou biofertilisants).
- Expliquez comment chaque mesure améliore les propriétés du sol et son influence sur la qualité du raisin.

2. Gestion efficace de l'eau

- Concevez un nouveau système d'irrigation plus efficace (par exemple, goutte-à-goutte, irrigation à déficit contrôlé, capteurs d'humidité, modèle AquaCrop).
- Indiquez comment vos décisions peuvent réduire la consommation d'eau et les dépenses énergétiques associées.

3. Biodiversité fonctionnelle

- Proposez des actions visant à promouvoir la biodiversité (par exemple : haies, corridors verts, nichoirs, plantes auxiliaires).
- Expliquez comment ces mesures contribuent à la lutte naturelle contre les ravageurs et à la résilience du vignoble.

Co-funded by the European Union
Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

4. Transition énergétique

- Proposez des mesures visant à réduire la consommation d'énergie et à remplacer les sources fossiles par des sources renouvelables (par exemple : photovoltaïque, biomasse, géothermie, systèmes hybrides).
- Expliquer comment ces mesures peuvent améliorer l'autosuffisance et réduire les émissions de GES.

5. Stratégie climatique et valeur marchande

- Indiquez comment votre proposition contribuera à réduire l'empreinte carbone de la cave (en tenant compte des scopes 1, 2 et 3 du protocole GHG).
- Choisissez une ou deux certifications environnementales ou de durabilité (par exemple, International Wineries for Climate Action ou B Lab) que la cave pourrait obtenir, et expliquez comment elles amélioreraient son image de marque et son accès aux marchés haut de gamme.

Références

- Abad, J., Marqués, M. J., & Álvaro-Fuentes, J. (2021). Conservation des sols dans les vignobles : une revue mondiale. Agronomie pour le développement durable, 41(45), 1–22.

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Évapotranspiration des cultures : lignes directrices pour le calcul des besoins en eau des cultures (Document n° 56 de la FAO sur l'irrigation et le drainage). FAO. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

- Almeida, W. S., Paredes, P., Basto, J., Pôças, I., Pacheco, C. A., & Paço, T. A. (2024). Estimation de l'évapotranspiration des vignes pluviales en combinant la télédétection et le modèle d'équilibre hydrique du sol SIMDualKc. Water, 16(18), 2567. https://doi.org/10.3390/w16182567

- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). Approches technologiques de l'agriculture durable à la croisée des chemins : une perspective agroécologique. Sustainability, 9(3), 349. https://doi.org/10.3390/su9030349

- Bàrberi, P., Burgio, G., Dinelli, G., Moonen, A. C., Otto, S., Vazzana, C., & Zanin, G. (2010). Biodiversité fonctionnelle dans le paysage agricole : relations entre les mauvaises herbes et la faune arthropode. Weed Research, 50, 388–401. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00798.x

- Bavaresco, L., Gatti, M., Fregoni, M., & Pezzutto, S. (2016). Porte-greffes de vigne : effets sur la viticulture et l'environnement. Acta Horticulturae, 1136, 41–50. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1136.6

- Biddoccu, M., Ferraris, S., Pitacco, A., Cavallo, E., & Comolli, R. (2016). Mesures des précipitations et du ruissellement dans les vignobles en pente : évaluation des mesures de contrôle des inondations et de l'érosion des sols. Australian Journal of Grape and Wine Research, 22(1), 54–67. https://doi.org/10.1111/ajgw.12173

- Bindi, M., & Olesen, J. E. (2011). Les réponses de l'agriculture européenne au changement climatique. Regional Environmental Change, 11(1), S151–S158. https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x

- Bordelon, B. P., Bates, T. R., & Morris, J. R. (2020). La gestion des sols et son impact sur la croissance de la vigne et la qualité des fruits. American Journal of Enology and Viticulture, 71(2), 123–134. https://doi.org/10.5344/ajev.2020.19054

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

- Brunori, G., Cerruti, A., & Corsi, S. (2020). Bilan carbone et potentiel d'atténuation du secteur viticole. Journal of Cleaner Production, 271, 122645. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122645

- Celette, F., Gaudin, R., & Gary, C. (2008). Changements spatiaux et temporels du régime hydrique d'un vignoble méditerranéen suite à l'adoption de cultures de couverture. European Journal of Agronomy, 29, 153–162. https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.04.007

- Celette, F., Gaudin, R., & Gary, C. (2009). Compétition pour l'azote dans un système de culture intercalaire non fertilisé. European Journal of Agronomy, 30, 41–51. https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.07.003

- Delmotte, F., Corio-Costet, M. F., & Delière, L. (2020). Gestion intégrée des maladies et réduction de l'utilisation des pesticides en viticulture. Science of the Total Environment, 731, 139269. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139269

- Er-Raki, S. (2024). Utilisation d'AquaCrop pour l'irrigation et l'évaluation de la productivité hydrique des raisins de table. E3S Web of Conferences, 489, 04011. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448904011

- Commission européenne. (2021a). Stratégie de l'UE pour les sols à l'horizon 2030. https://environment.ec.europa.eu/publications/eu-soil-strategy-2030_en

- Commission européenne. (2021b). Transition verte dans les caves de l'UE : énergies renouvelables et durabilité. Office des publications de l'Union européenne.

- Commission européenne. (2022). Les technologies numériques au service de l'efficacité énergétique dans le secteur vitivinicole. EU Science Hub.

- FAO. (2017). L'avenir de l'alimentation et de l'agriculture – Tendances et défis. https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf

- Gambetta, G. A., Herrera, J. C., Dayer, S., Feng, Q., Hochberg, U., & Castellarin, S. D. (2020). La physiologie du stress hydrique chez la vigne. Journal of Experimental Botany, 71(16), 4658–4676. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa245

- García, L., Miñarro, M., Martínez-Sastre, R., & García, D. (2018). Couvre-sols et biodiversité dans les vignobles méditerranéens. Agriculture, Ecosystems & Environment, 267, 100–111. https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.017

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

- García, M., Hernández, L., & Santesteban, L. G. (2022). Les jumeaux numériques en viticulture. Agronomie, 12(4), 856. https://doi.org/10.3390/agronomy12040856

- Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J. F., & Ruiz-Sinoga, J. D. (2016). Effets des traitements de la couche arable dans un climat méditerranéen sec. Solid Earth, 7(5), 1479–1489. https://doi.org/10.5194/se-7-1479-2016

- International Wineries for Climate Action (IWCA). (2022). Meilleures pratiques pour la décarbonisation dans la production viticole [Rapport technique].

- Intrigliolo, D. S., & Castel, J. R. (2011). Effets interactifs de l'irrigation déficitaire et de l'éclaircissage des pousses et des grappes. Irrigation Science, 29(6), 443–452. https://doi.org/10.1007/s00271-010-0258-y

- Ismail, S. M. (2025). Biofertilisants et amélioration du carbone dans les sols des vignobles méditerranéens. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 25(3), 1023–1037. https://doi.org/10.1007/s42729-025-01234-9

- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2010). Changement climatique et qualité mondiale du vin. Changement climatique, 73(3), 319–343. https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2

- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls. Journal of Experimental Botany, 55(407), 2427–2436. https://doi.org/10.1093/jxb/erh213

- Kumar, P. (2022). Application of sap flow sensors for irrigation scheduling. Frontiers in Plant Science, 13, 1021387. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1021387

- Lal, R. (2004). Impacts de la séquestration du carbone dans le sol sur le changement climatique mondial. Science, 304, 1623-1627.

- Lal, R. (2020). Matière organique du sol et rétention d'eau. Agronomy Journal, 112(5), 3755–3768. https://doi.org/10.1002/agj2.20282

- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Le biochar pour la gestion environnementale (2e éd.). Routledge.

- López-Vicente, M., Álvarez, S., & Marqués, M. J. (2020). Conservation des sols et de l'eau dans les vignobles en pente. Agricultural Water Management, 240, 106267. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106267

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

- Lucchetta, M., Rossi, F., & Rombolà, A. D. (2025). Évaluation du compost issu des résidus de taille et de vinification. Frontiers in Sustainable Food Systems, 9, 1504761. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1504761

- Malvoni, M., Congedo, P., & Laforgia, D. (2017). Analyse de la consommation d'énergie : étude de cas d'un domaine viticole italien. Energy Procedia, 126, 227–233. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.144

- Martínez-Casasnovas, J. A., Escolà, A., & Ramos, M. C. (2012). Zones de gestion spécifiques au site dans la viticulture de précision. Precision Agriculture, 13, 622–638.

- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J. M., Pou, A., Fuentes, S., & Bota, J. (2015). Amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les vignobles. Agronomie pour le développement durable, 35, 499-517. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0280-z

- Mirás-Avalos, J. M., Trigo-Córdoba, E., & Buesa, I. (2021). Optimisation de la gestion de l'eau dans les vignobles. Eau, 13(6), 746. https://doi.org/10.3390/w13060746

- Morlat, R., & Symoneaux, R. (2008). Effet à long terme des systèmes de gestion des sols. Vitis, 47(4), 201–208.

- Pardo, G., Moral, R., Aguilera, E., & del Prado, A. (2019). Émissions de GES et potentiel d'atténuation dans l'agriculture espagnole. Environmental Science & Policy, 94, 119–129. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.020

- Pattara, C., Raggi, A., & Cichelli, A. (2012). Analyse du cycle de vie et empreinte carbone dans la chaîne d'approvisionnement du vin. Environmental Management, 49(6), 1247–1258. https://doi.org/10.1007/s00267-012-9844-3

- Ripoche, A., Metay, A., Celette, F., & Gary, C. (2011). Changement dans la gestion de la surface du sol dans les vignobles. Plant and Soil, 339, 259–271. https://doi.org/10.1007/s11104-010-0573-1

- Ruiz-Colmenero, M., Bienes, R., & Marqués, M. J. (2013). Dilemmes liés à la conservation des sols et de l'eau dans les vignobles en pente. Soil and Tillage Research, 126, 111–118. https://doi.org/10.1016/j.still.2012.09.006

- SARE. (2022). Managing cover crops profitably (3e éd.). USDA. https://www.sare.org/resources/managing-cover-crops-profitably/

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.

- Van Leeuwen, C., & Darriet, P. (2016). L'impact du changement climatique sur la viticulture et la qualité du vin. Journal of Wine Economics, 11(1), 150–167. https://doi.org/10.1017/jwe.2016.7

- Van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., de Rességuier, L., & Schultz, H. (2019). Impact du changement climatique sur la viticulture. Bulletin de l'OIV, 92, 1–27.
- Wine Intelligence. (2021). Tendances en matière de vins haut de gamme et de durabilité : aperçu des consommateurs mondiaux. Série de recherches Wine Intelligence.

- Wine Spectator. (2022). Vins durables : impact sur le marché et préférences des consommateurs. Rapport Wine Spectator Insights.

- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Le big data dans l'agriculture intelligente : une revue. Agricultural Systems, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enrichit les vies, ouvre les esprits.