



UFR de Sciences et Technologies de Reims

Master Sciences de la Vigne et du Vin – Viticulture et Environnement

Année 2022 – 2023



Chambre d'Agriculture de Vaucluse

Effet d'une haie en agroforesterie sur le développement de la vigne dans un contexte de climat méditerranéen

Etudiant : Anaïs VANDER CRUYSEN

Maître de stage : Laura TABUTEAU

Résumé

Le changement climatique conduit à repenser notre façon de cultiver la vigne. Les hausses importantes de températures et la diminution des précipitations dans le bassin méditerranéen sont des menaces pour la qualité des futurs vins. Plusieurs alternatives sont possibles pour réduire ces effets, dont l'agroforesterie. Ce système de conduite vise à associer sur une même parcelle, une culture et une ou des espèce(s) ligneuse(s) pérennes(s). Les effets de l'agroforesterie sur le vignoble sont encore mal connus. Le projet Viticulture et Agroforesterie en Méditerranée (VITAM) vise à récolter des données sur l'effet de différents systèmes agroforestiers sur le vignoble. Pour cela, plusieurs critères ont été évalués : la phénologie, la croissance de la vigne, le micro-climat et l'état hydrique du sol. Les résultats montrent que la haie n'induit pas un retard ou une précocité des stades phénologiques, réduit la croissance des rameaux, modifie légèrement le microclimat à sa proximité et a un effet compétiteur hydrique.

Mots-clés : agroforesterie, vigne, alternatives, haie, changement climatique

Abstract

Climate change allows us to think about the way vineyards are conducted. The wine of the mediterranean basin are threaten by high temperatures and low rates of precipitations. Several alternatives are proposed to reduced the negative effects, and agroforestry is one of them. It is the use of woody and perrenials species on the same space that cultural species. The Viticulture and Agroforestry in the Mediterranean region projet, is collecting datas of the agroforestry effects on vineyards. Differents criterias have been observed : phenology, grapevine growth, micro-climate and hydric status of the soil. Results shows that the phenological stages are not later nor earlier near the hedge, it decreases the grapevine growth, it slightly modify the microclimate near it, and it has competitor effects for water.

Key-words :agroforestry, grapevine, alternative, hedge, climate change

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Laura, de m'avoir accueillie à la Chambre d'Agriculture et sans qui ce stage n'aurait pas été possible. Merci pour ta bonne humeur, ta patience et ta confiance. J'attends toujours de chanter à tue-tête *Les rois du monde* dans la voiture. Merci à Clarisse pour tout ce que tu m'as appris, pour les tournées passées ensemble et tes remarques intéressantes sur ce mémoire. Merci à Silvère d'avoir répondu à toutes mes questions, à Vincent pour les discussions sur l'avenir. Merci à François, le chef d'équipe qui est toujours un passionné et qui est toujours là pour nous enseigner. Merci à tout le reste de l'équipe viti de m'avoir accueilli dans leur équipe : Florine, Rémi, Marine, Nathalie, Séverine, et Régine.

Merci à Coralie et Emma, de m'avoir aidée dans les moments de galères (Emma, je me souviendrai toujours de notre attente de la fin de l'orage dans la voiture !). Je vous souhaite bonne continuation pour votre dernière année en master.

Merci à Clara, d'avoir répondu à mes questions sur le projet VITAM, ton expérience passée m'a bien servi !

Merci à Laurie, tu as été un véritable soutien quand j'en avais le plus besoin. Merci à Clothilde et Baptiste, pour nos apéro-visio !

Merci à Simon d'avoir été ma bouée pour *Rstudio*, sans toi, je me serais arrachée les cheveux pendant une bonne dizaine d'heures encore. Merci pour ton expertise sur les champignons et leur taxonomie changeante. Merci à Iliana, ton amitié vaut tout l'or du monde.

Merci à ma famille, d'avoir toujours été là, d'être toujours disponible pour moi. Merci d'être descendus me voir, cela m'a fait beaucoup de bien. Et aussi, merci d'avoir pris le temps de relire avec attention ce mémoire !

Enfin, merci à Fanny. Tu es apparue dans ma vie au milieu de ce stage et tu as rendu mes soirées moins solitaires. Ta petite bouille et tes câlins égayaient mes journées mêmes les plus difficiles. Je suis arrivée à Orange seule et je repars avec toi, mon petit chat.

Sommaire

Résumé.....	3
Abstract.....	3
Remerciements.....	5
Sommaire.....	6
Liste des figures.....	8
Liste des tableaux.....	8
Liste des sigles.....	9
Liste des abréviations.....	9
1. Introduction.....	11
1 – 1. La vigne et le vin en quelques chiffres.....	11
1 – 2. Le climat méditerranéen.....	13
L'oscillation nord-atlantique (NAO).....	13
Le mistral.....	13
Un climat sensible au changement climatique.....	15
1 – 3. Effets du changement climatique sur la vigne.....	15
Les effets de la sécheresse.....	15
Les effets des hausses de températures.....	17
1 – 4. Quelques alternatives pour s'adapter aux effets du changement climatique.....	19
Utilisation de matériel végétal adapté au changement climatique.....	19
Utilisation des symbioses fonctionnelles.....	21
Vers de nouvelles pratiques culturales.....	23
1 – 5. L'agroforesterie : généralité et son lien avec le monde viticole.....	25
Généralités sur l'agroforesterie.....	25
L'agroforesterie, un moyen de lutter contre les effets négatifs du changement climatique.....	27
Quels sont les freins de l'agroforesterie pour les viticulteurs ?.....	29
1 – 6. Le projet VITAM : étudier l'effet de l'agroforesterie sur les caractéristiques agronomiques de la vigne.....	29
2. Matériel et méthode.....	33
2 – 1. Cartographie de la parcelle.....	33
2 – 2. Caractéristiques de la parcelle.....	33
Matériel végétal.....	33
Conduite de la parcelle.....	33
La haie.....	35
2 – 3. Suivis de la phénologie.....	35
Débourrement.....	35
Floraison.....	35
Véraison.....	35
2 – 4. Suivi de la croissance.....	35
Mesure des rameaux.....	37
Suivi de l'apex.....	37
Mesure de la masse surfacique.....	37
2 – 5. Micro-climat de la vigne.....	37
Mesures de l'humidité et de la température au niveau des grappes.....	37
Tensiométrie du sol.....	37
2 – 6. Mesure de la teneur en chlorophylle.....	39
2 – 7. Évaluation des maladies.....	39
2 – 8. Suivi de la biodiversité.....	39
2 – 9. Tests statistiques.....	39
3. Résultats.....	41
3 – 1. Le climat 2022-2023.....	41

3 – 2. Effet sur les maladies.....	41
3 – 3. Effet sur les stades phénologiques.....	43
Le débourrement.....	43
La floraison.....	43
La véraison.....	45
3 – 4. Effet sur la croissance.....	45
Les rameaux.....	45
Les apex.....	45
Masse surfacique.....	45
3 – 5. Effet sur le micro-climat.....	47
Température.....	47
Humidité.....	47
Tensiométrie du sol.....	49
3 – 6. Effet sur la teneur en chlorophylle.....	49
3 – 7. La biodiversité.....	49
4. Discussion.....	51
4 – 1. Les aléas rencontrés et les pistes d'améliorations possibles.....	51
4 – 2. L'effet de la haie sur le vignoble.....	51
La haie, un réservoir à biodiversité.....	51
La haie, une protection contre le vent.....	53
La haie, un compétiteur pour l'eau.....	53
4 – 3. Comparaison des années 2022 et 2023.....	55
4 – 4. Ce qu'on peut attendre pour les vendanges de 2023.....	57
4 – 5. Les résultats du projet VITAM et leurs mises en perspective.....	57
5. Conclusion.....	61
Bibliographie.....	64
Annexe.....	70

Liste des figures

Figure 1: Vendanges d'automne au Moyen-Âge (Tacuina sanitatis, XIVème siècle).....	10
Figure 2: Effet du NAO positif et négatif sur le bassin méditerranéen (Cassou 2004).....	12
Figure 3: Scénarios des températures d'ici 2070-2100. Pire scénario : (a), (b), (c) et (d). Scénario moins alarmant : (d), (e), (f), (g). (a) et (d) : décembre, janvier, février ; (b) et (e) : mars, avril, mai ; (c) et (f) : juin, juillet, août ; (d) et (g) : septembre, octobre, novembre. (Ozturk et al, 2015).....	14
Figure 4: Scénarios des précipitations d'ici 2070-2100. Pire scénario : (a), (b), (c) et (d). Scénario moins alarmant : (d), (e), (f), (g). (a) et (d) : décembre, janvier, février ; (b) et (e) : mars, avril, mai ; (c) et (f) : juin, juillet, août ; (d) et (g) : septembre, octobre, novembre. (Ozturk et al, 2015).....	14
Figure 5: Effet des hautes températures sur la dégradation des acides et la synthèse des anthocyanines (créé avec BioRender).....	16
Figure 6: Dates relatives de floraison et véraison de différents cépages (Parker et al, 2013).....	18
Figure 7: Les différents types d'aménagements agroforestiers (créé avec BioRender).....	24
Figure 8: Aérodynamisme du vent, en amont et en aval d'une haie imperméable (A) ou perméable (B) (Guyot 1983).....	26
Figure 9: Effet de l'ombrage sur la surface des feuilles (A), et le volume et poids des baies (B). S0 : pas d'ombrage; Sf : ombrage de la floraison à la maturité; Sv : ombrage de la véraison à la maturité (Oliveira, Barbosa et Olazabal, 2011).....	26
Figure 10: Les sites du projet et leurs caractéristiques (Mémoire de stage de Clara Bertrand, 2022).....	30
Figure 11: Présentation du site expérimental (créé avec BioRender).....	32
Figure 12: Statut des apex (Pichon 2021).....	36
Figure 13: Contrainte hydrique de la vigne en fonction de son index de croissance (Institut Rhodanien).....	36
Figure 14: Nichoir à abeilles solitaires.....	38
Figure 15: Climat de Orange, du 1er Avril au 15 Août 2023 (https://www.meteo-concept.fr/).....	40
Figure 16: Nombre de tâches de mildiou observées et leur intensité (04/07/2023).....	40
Figure 17: Evolution de la floraison au cours du temps.....	42
Figure 18: Nombre de rameaux (A) et longueur des rameaux (B) en fonction du rang.....	44
Figure 19: Evolution des apex en fonction du rang. * : p-value<0,05 ; ** : p-value<0,01 ; *** : p-value<0,001.....	44
Figure 20: Evolution de la tensiométrie du sol en fonction des précipitations.....	48
Figure 21: Profil de la hauteur de la haie basse diversifiée.....	52
Figure 22: Evolution de la température en fonction de la distance d'une haie brise-vent (McNaughton 1988).....	52
Figure 23: Evolution du potentiel hydrique foliaire de base en 2022.....	54
Figure 24: Paramètres de rendement des vendanges 2022.....	56

Liste des tableaux

Tableau 1: Résistance des portes-greffes au stress hydrique selon différentes échelles (Serra et al 2014).....	20
Tableau 2: Pourcentage de bourgeons représentés dans chaque classe de l'échelle BBCH.....	42
Tableau 3: Pourcentage de grappes représentés dans chaque classe de l'échelle BBCH.....	42
Tableau 4: Pourcentage de baies à véraison.....	44
Tableau 5: Températures et humidités relatives moyennes du rang 1 et témoin au cours des mois de mai, juin et juillet.....	46
Tableau 6: Indice de chlorophylle en fonction du rang.....	48
Tableau 7: Résultats des contrôles maturités de 2022.....	56

Liste des sigles

° : degré
°C : degré celsius
% : pourcentage
km/h : kilomètre par heure
m : mètre
h : heure
h : hauteur
pH : potentiel d'hydrogène
kg : kilogramme
g : gramme
ha : hectare
L : litre
g/L : gramme par litre
mg/L : milligramme par litre
kg.ha⁻¹ : kilogramme par hectare
€ : euro
n° : numéro

Liste des abréviations

ABA : Acide Abscissique
BBCH : Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische
BCAE : Bonne Conduite Agricole et Environnementale
C₆H₁₂O₆ : Glucose
CO₂ : Dioxyde de carbone
FEVS : Fédération des Exportateurs des Vins et Spiritueux de France
GFV : Grapevine flowering veraison
GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
H₂O : Eau
INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
NAO : Oscillation Nord-Atlantique
O₂ : Dioxygène
OAB : Observation Agricole de la Biodiversité
OIV : Organisation Internationale de la Vigne et du vin
PACA : Provence-Alpes-Côtes-d'Azur
ROS : Reactive Oxygen Species
SPAD : Soil and Plant Analyze Developments
UFGT : UDP-glucose:flavonoid 3-O-glucosyltransferase
VITAM : Viticulture et Agroforesterie en Méditerranée

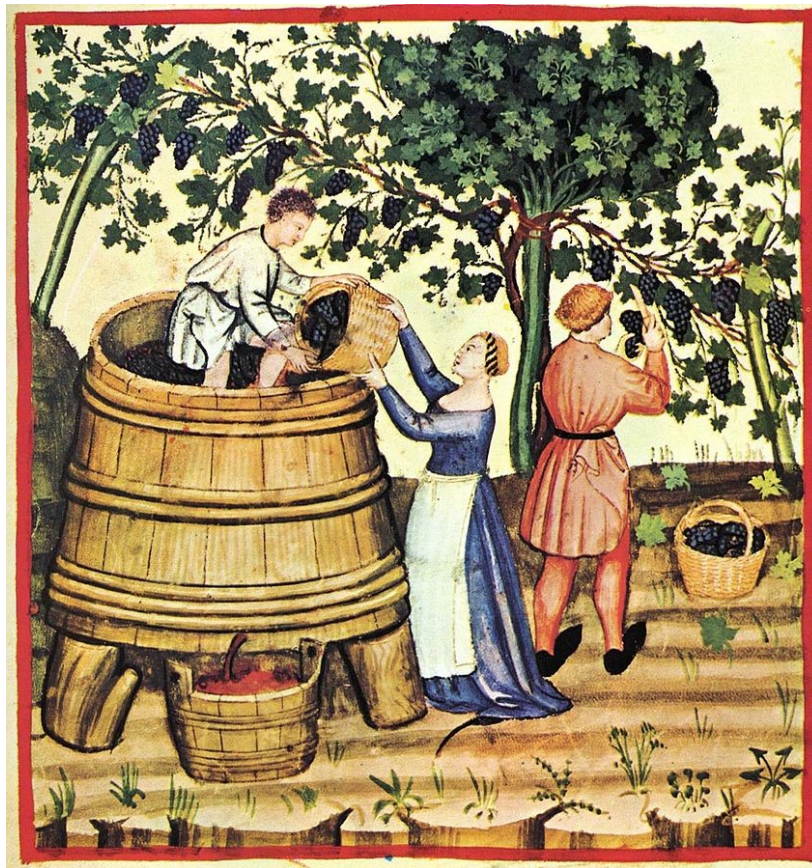


Figure 1: Vendanges d'automne au Moyen-Âge (Tacuina sanitatis, XIVème siècle)

1. Introduction

La vigne (*Vitis vinifera*) est une culture très ancienne dont les pratiques ont beaucoup évoluées avec le temps. C'est une liane, c'est-à-dire qu'elle a besoin de supports tels que des arbres pour se développer. Lors de sa domestication par l'Homme, la vigne était cultivée en association avec d'autres arbres, de l'Antiquité jusqu'au Moyen-Âge (Figure 1) (Bastide *et al.* 2022). Puis, les moines du Moyen-Âge ont commencé à mettre en place un système de culture qui ne nécessitait pas d'arbres, et plus tard, avec la mécanisation des travaux agricoles, les arbres ont disparu du paysage viticole.

Les hausses de températures et les baisses de précipitations prévues d'ici 2070-2100 (GIEC) dans le bassin méditerranéen conduisent à des conditions non favorables au développement des végétaux. En effet, le cycle végétatif de la vigne dépend de la période de dormance, et il faut des températures inférieures à 10°C pour que la vigne puisse atteindre ce stade (Ashenfelter and Storchmann 2014). Dans les pays tropicaux où la vigne n'est pas en dormance, cela conduit à deux vendanges par an. Cela entraîne une diminution de la durée de vie des ceps et de la fructification des rameaux, ainsi qu'à une irrégularité des débourrements (Ashenfelter and Storchmann 2014). En supposant que les températures continueront d'augmenter, les vignes du bassin méditerranéen auront le même comportement. Ceci pourrait induire une perte économique ainsi qu'une diminution de la qualité des raisins. Pour pallier les effets négatifs du changement climatique, il paraît intéressant de réfléchir aux alternatives possibles. Plusieurs sont envisagées, mais aucune n'apparaît comme une solution durable. De plus, certaines alternatives nécessitent l'utilisation de nouvelles variétés. Dans le monde viticole, où la notion de terroir dépend des cépages, l'arrivée de nouvelles variétés n'en est pour le moment qu'à ses débuts. Une des alternatives envisagées est l'agroforesterie. C'est une pratique de plus en plus étudiée, mais à ce jour, son effet sur le vignoble manque de données.

C'est dans ce contexte que le projet Viticulture et Agroforesterie en Méditerranée (VITAM) se place, avec pour but de récolter des données agronomiques sur l'effet d'aménagements agroforestiers dans le bassin méditerranéen. Le projet est mené par la société AGROOF dont la Chambre d'Agriculture de Vaucluse est partenaire. La Chambre d'Agriculture est un établissement public dont le but est d'accompagner les agriculteurs et les territoires, en participant à des programmes de recherches, en développant des projets, en conseillant les agriculteurs et en étant leurs portes-paroles face aux pouvoirs publics. La Chambre de Vaucluse gère plusieurs activités agricoles, dont la viticulture. L'équipe viticulture mène des projets sur plusieurs sujets d'actualité (adaptations au changement climatique, variétés résistantes, réduction des produits phytosanitaires, agroécologie...) tout en ayant une activité de conseils aux viticulteurs.

1 – 1. La vigne et le vin en quelques chiffres

L'Europe représente 59 % de la production mondiale de vin (Agreste, 2022) et 48 % de la consommation mondiale (Statista 2022) en 2021. Les principaux pays producteurs sont l'Italie, la France et l'Espagne et ils représentent 47 % de la production mondiale de vin (Statista 2022).

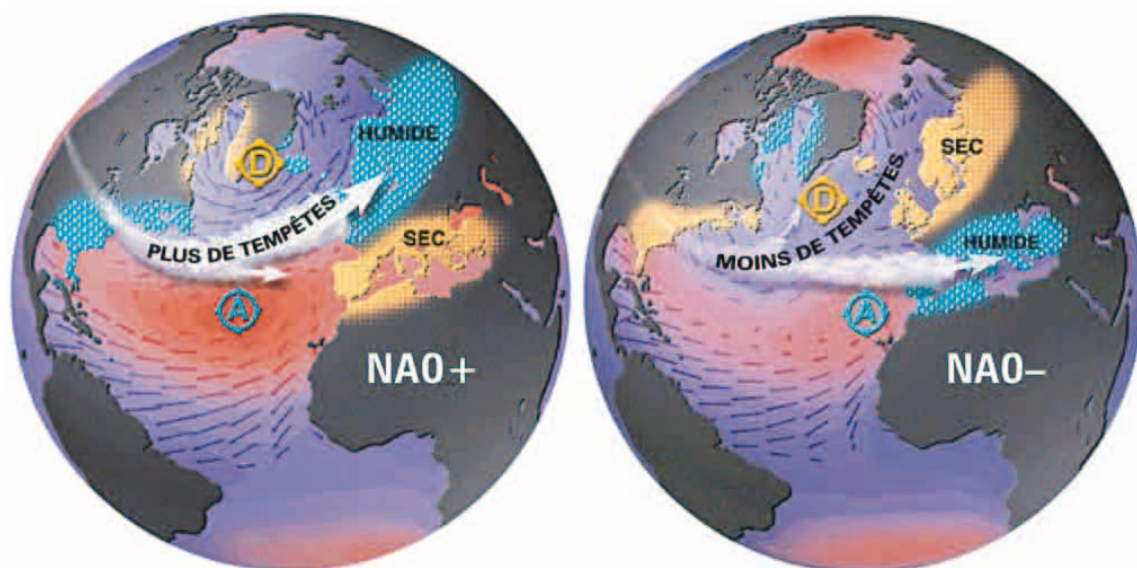


Figure 2: Effet du NAO positif et négatif sur le bassin méditerranéen (Cassou 2004)

Le marché du vin en France représente 700 maisons de négoce en 2021, 813 000 ha de vignes (au 31 juillet 2021), soit 3 % des surfaces agricoles françaises (Vin et Société 2021), et en moyenne 42 millions d'hectolitres par an (FEVS 2022), ce qui représente un chiffre d'affaires de 10,5 milliards d'euros (FEVS 2022). Sur les 101 départements français, 90 ont une activité viticole (Vin et Société 2021).

La région de Provence-Alpes-Côtes-d'Azur (PACA) a une superficie viticole de 92 300 ha, soit près de 11 % de la surface viticole totale française (Chambre d'Agriculture PACA 2020). Les principaux départements producteurs sont le Vaucluse et le Var qui représentent respectivement 54 % et 32 % de la surface viticole de la région.

1 – 2. Le climat méditerranéen

La région PACA, située dans le bassin méditerranéen, qui est caractérisée par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs (Giorgi and Lionello 2008), est considéré comme semi-aride (Aguilera *et al.* 2020). Le bassin est entouré par le climat aride nord-africain et le climat tempéré et pluvieux de l'Europe centrale (Giorgi and Lionello 2008). En hiver, les climats sont dominés par les mouvements de l'ouest qui viennent de l'Atlantique (Giorgi and Lionello 2008).

L'oscillation nord-atlantique (NAO)

Le climat du bassin dépend de plusieurs facteurs climatiques dont les oscillations Nord-Atlantiques (NAO) (Giorgi and Lionello 2008), qui correspondent à la différence de pression entre le Nord et le Sud de l'océan Atlantique (Antoniadou *et al.* 2001). Si la valeur de la NAO est positive, alors les masses d'airs humides sont au nord de l'Europe et les masses d'airs chauds au niveau du bassin méditerranéen (Cassou 2004). Les hivers sont alors plutôt doux et humides en Europe (Cassou 2004) (Figure 2). Si la valeur de la NAO est négative, les masses d'airs sèches arrivent au niveau du nord de l'Europe et des masses humides au niveau de bassin méditerranéen (Antoniadou *et al.* 2001; Cassou 2004), les hivers sont froids et secs (Antoniadou *et al.* 2001) (Figure 2).

Le mistral

Le climat méditerranéen est sous l'influence des vents dominants (Giorgi and Lionello 2008). En France, le vent dominant caractéristique du bassin méditerranéen est le mistral. Ce vent est créé par les vents polaires qui viennent frapper contre les Alpes (c'est l'effet foehn) et qui s'accroissent le long de la vallée du Rhône (Jacq *et al.* 2005). C'est un vent chaud qui réchauffe les plaines en journée et les refroidit la nuit (Jacq *et al.* 2005). Les rafales du mistral peuvent dépasser les 100 km/h (Jacq *et al.* 2005), entraînant des dommages sur les cultures pérennes telles que la vigne. Le mistral assèche le sol, augmentant ainsi l'évapotranspiration des plantes (Jacq *et al.* 2005). Les végétaux s'assèchent et sont donc plus sensibles aux risques d'incendies, dont le mistral facilite la propagation (Jacq *et al.* 2005).

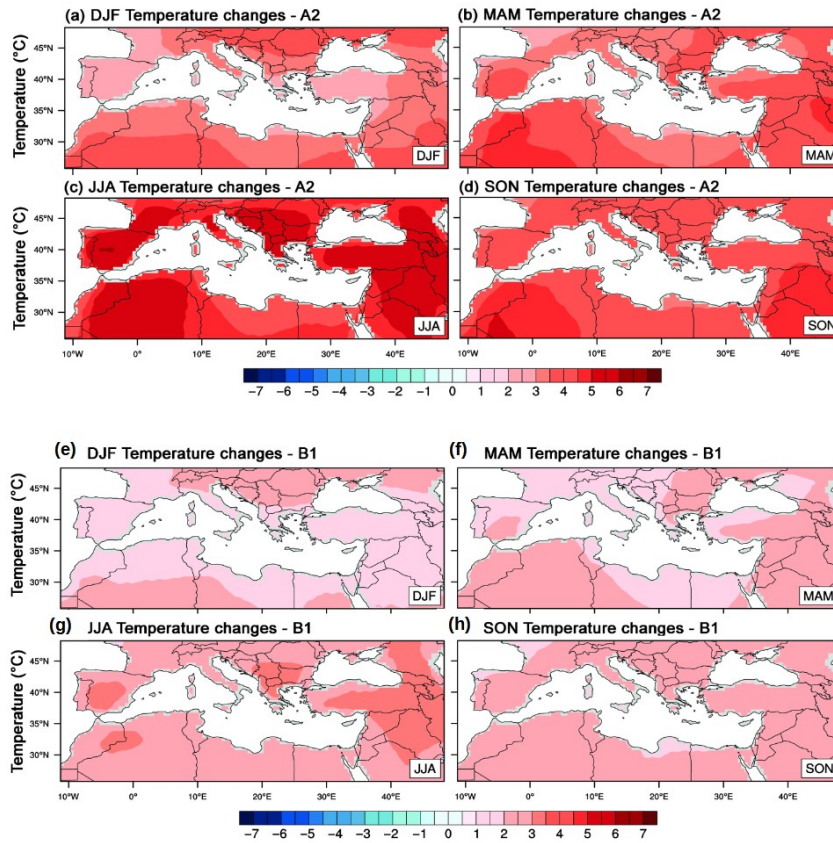


Figure 3: Scénarios des températures d'ici 2070-2100. Pire scénario : (a), (b), (c) et (d). Scénario moins alarmant : (e), (f), (g). (a) et (d) : décembre, janvier, février ; (b) et (e) : mars, avril, mai ; (c) et (f) : juin, juillet, août ; (d) et (g) : septembre, octobre, novembre. (Ozturk et al, 2015)

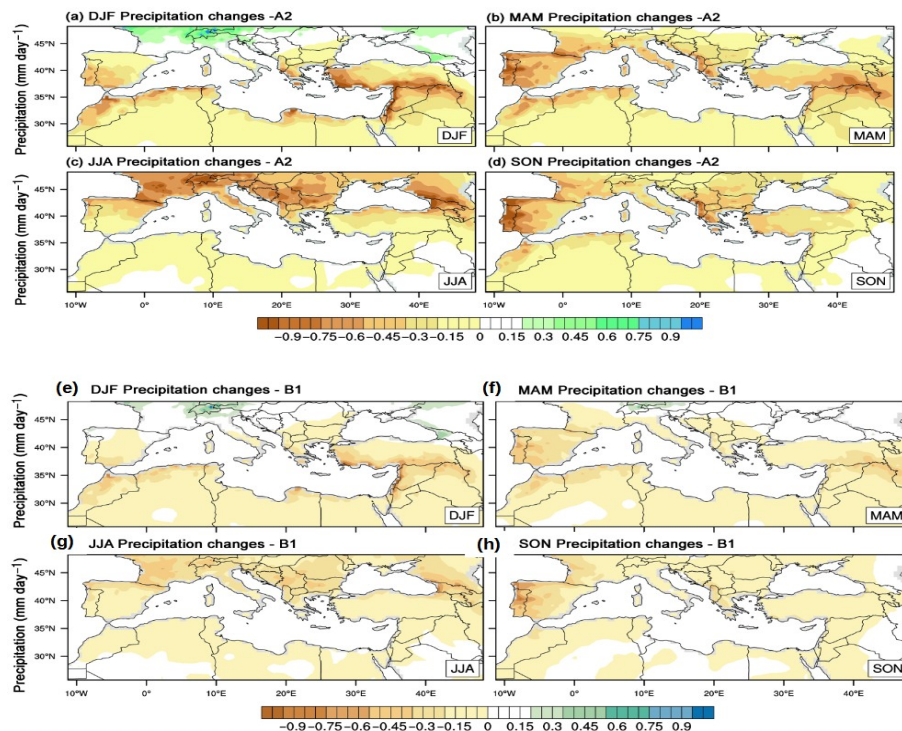


Figure 4: Scénarios des précipitations d'ici 2070-2100. Pire scénario : (a), (b), (c) et (d). Scénario moins alarmant : (e), (f), (g). (a) et (d) : décembre, janvier, février ; (b) et (e) : mars, avril, mai ; (c) et (f) : juin, juillet, août ; (d) et (g) : septembre, octobre, novembre. (Ozturk et al, 2015)

Un climat sensible au changement climatique

Plusieurs études se sont intéressées aux projections de climat d'ici 2070-2100 (GIEC) dans plusieurs parties du monde, dont le bassin méditerranéen. D'après le scénario le plus pessimiste avec les plus fortes augmentations de températures, il y aura une augmentation de température entre 1,5°C et 6,5°C dans le bassin méditerranéen (Figure 3) (Ozturk *et al.* 2015). Ces effets seront principalement visibles en été (Figure 3.c) (Giorgi and Lionello 2008). Pour le scénario le moins pessimiste, les augmentations de températures se feront entre 1,5°C et 4°C (Ozturk *et al.* 2015).

Le changement climatique diminuera aussi les précipitations au nord du bassin méditerranéen dont fait partie la France (Figure 4) (Ozturk *et al.* 2015). D'après l'étude de Giorgi et Lionello (2008), il y aura une baisse de 28 % des précipitations en 2081-2100 par rapport à aujourd'hui.

Des études ont montré que dans les décennies à suivre, les valeurs des NAO seraient positives avec des valeurs de plus en plus élevées, ce qui suggère l'augmentation d'apparition des saisons extrêmes (Giorgi and Lionello 2008).

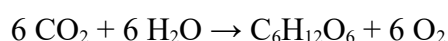
Ces conséquences, combinées aux effets anthropiques, rendent ce climat très sensible au changement climatique (Aguilera *et al.* 2020).

1 – 3. Effets du changement climatique sur la vigne

Les principaux effets du changement climatique sont : une augmentation des températures, de plus grandes périodes de sécheresse et une diminution des précipitations (del Pozo *et al.* 2019). Cela a de nombreuses conséquences sur le développement des végétaux.

Les effets de la sécheresse

Les scénarios prévoient moins de précipitations, ce qui empêchera les nappes phréatiques de se remplir pendant les saisons automnales, hivernales et printanières (Lereboullet *et al.* 2014). Or, même pendant les périodes de sécheresse, les végétaux réalisent l'évapotranspiration, créant ainsi un déficit hydrique (del Pozo *et al.* 2019). Cela entraînera des perturbations de la photosynthèse, créant des dommages sur les feuilles et conduisant à un blocage de la maturation des baies (van Leeuwen and Darriet 2016). Pour rappel, la photosynthèse se résume à l'équation suivante :



Elle montre l'importance de l'eau dans la réalisation de la photosynthèse. La synthèse des sucres dépend en partie de la disponibilité en eau pour la plante. Les sucres synthétisés subiront de nombreuses transformations dans la cellule (Figure 5), conduisant à la synthèse de molécules organiques (lipides, acides aminés, acides nucléiques) (Figure 5). Les prévisions de sécheresse et de fortes températures suggèrent une augmentation de l'évapotranspiration des végétaux (del Pozo *et al.* 2019). Le déficit hydrique entraîne une diminution de la synthèse de molécules organiques, réduisant la disponibilité des ressources nécessaires au bon fonctionnement des végétaux. De plus, le stress hydrique entraîne la formation d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) qui affectent négativement le métabolisme des cellules (Serra *et al.* 2014). Pour finir, le stress hydrique crée un

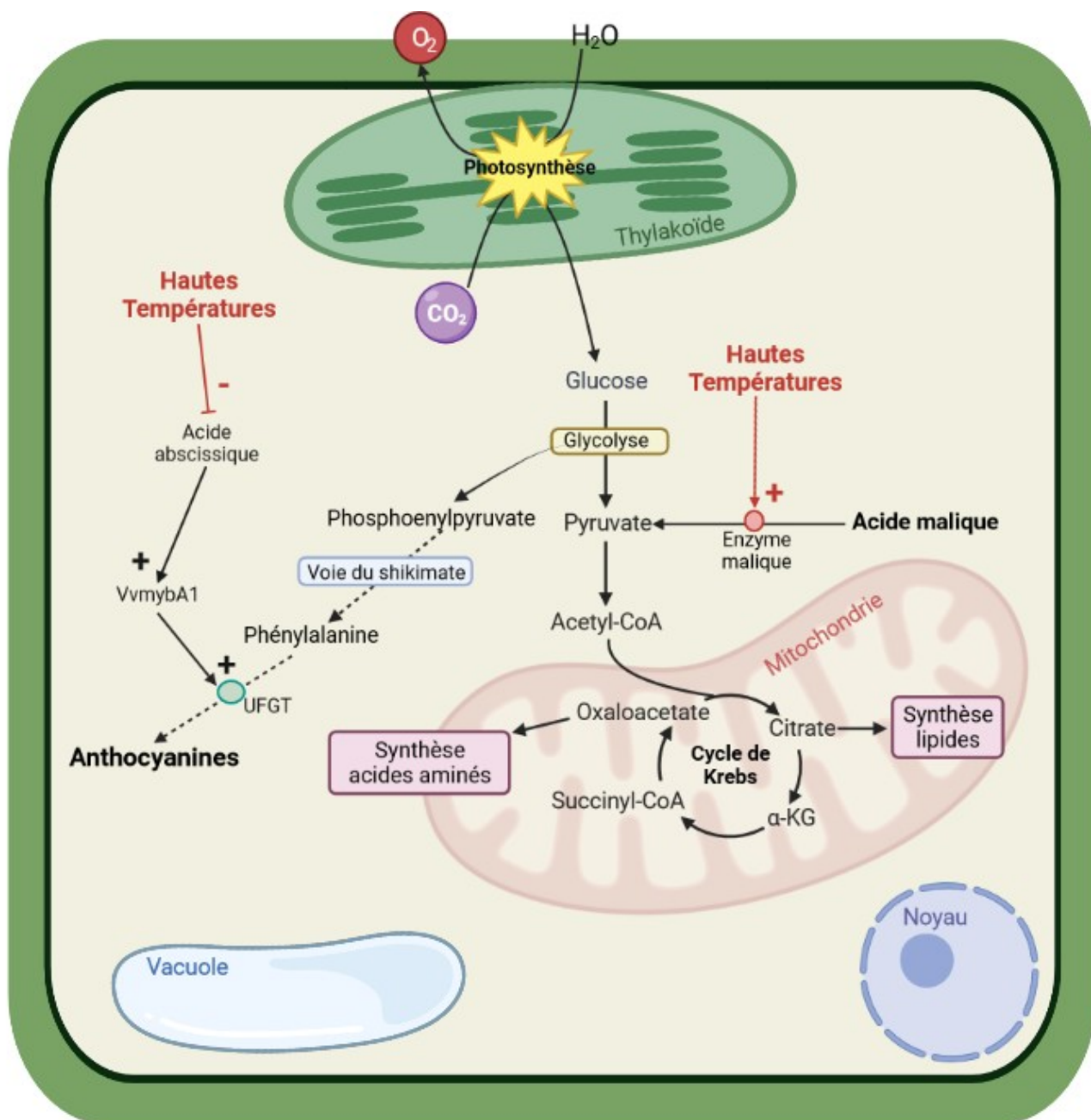


Figure 5: Effet des hautes températures sur la dégradation des acides et la synthèse des anthocyanines (créé avec BioRender)

stress osmotique qui perturbe les divisions et les élongations cellulaires (Serra *et al.* 2014), ce qui affectent les tissus de la plante.

Les effets des hausses de températures

La température est un facteur important dans le développement de la vigne. En effet, c'est un des facteurs externes de la levée de dormance des bourgeons. Sa hausse conduit à une avancée des dates des stades phénologiques et donc à des vendanges plus précoces. (van Leeuwen and Darriet 2016). En conditions contrôlées, Pouget (1966) a mis en évidence que la vitesse de croissance des rameaux suit une loi exponentielle pour des températures comprises entre 15°C et 25°C. En dessous et au-delà, la vitesse de croissance est plus faible (Pouget 1966).

La température contrôle aussi les facteurs biochimiques qui ont lieu lors de la véraison (Duchêne *et al.* 2010). Par exemple, l'augmentation de température entraîne une plus forte accumulation des sucres. À l'inverse, elle réduit la concentration en anthocyanes et acides maliques (Duchêne *et al.* 2010). Les anthocyanines sont des molécules de la classe des flavonoïdes (Jaakola 2013), responsables des couleurs rouges, violettes et bleues des fleurs et des fruits (Jaakola 2013). Elles sont synthétisées à partir de la phénylalanine (Figure 5) (Boss *et al.* 1996). La voie de biosynthèse des flavonoïdes à partir de la phénylalanine est régulée par plusieurs enzymes, dont la UDP-glucose : flavonoid 3-O-glucosyltransferase (UFGT) (Figure 5) (Boss *et al.* 1996). Cette enzyme est elle-même régulée par les gènes *myb*, ainsi que ses gènes apparentés dont *VvmybA1* (Kobayashi *et al.* 2005) (Figure 5). La régulation de ce gène se fait par l'acide abscissique (ABA) (Mori *et al.* 2007). Les hautes températures diminuent la concentration en ABA (Mori *et al.* 2007), ce qui réduit l'expression de *VvmybA1*. Il y a donc un contrôle négatif dans la voie de biosynthèse des anthocyanines, conduisant à leur faible concentration.

L'acide malique fait partie des acides synthétisés dans la baie. Lors de la maturation des baies, une augmentation en sucres et en acides est observée (Rienth *et al.* 2014). Les études comparatives sur les contenus en acide malique sous conditions chaudes (25-30°C) ou conditions froides (15-20°C), montrent que sa concentration est plus faible dans les conditions chaudes (Ruffner *et al.* 1976). Les mécanismes à l'origine de cette baisse de concentration lors de fortes chaleurs sont encore mal connus. Il a été montré que cette faible concentration n'était pas due à une baisse de la synthèse de l'acide malique, mais plutôt à une forte dégradation (Sweetman *et al.* 2014). Sa dégradation se fait par sa transformation en pyruvate (Rienth *et al.* 2014) catalysée par l'enzyme malique (Rienth *et al.* 2014) (Figure 5). Les hautes températures augmentent la biosynthèse de cette enzyme (Rienth *et al.* 2014). Le pyruvate entre dans le cycle de Krebs (Figure 5), dont une des enzymes clés est régulée positivement par les hautes températures (Rienth *et al.* 2014). La baisse de concentration en acide malique conduit à une élévation du pH dans les baies. Ce qui permet d'obtenir des vins plus ronds et doux, auxquels il faut ajouter du soufre pour apporter plus d'acidité (van Leeuwen and Darriet 2016). Les propriétés des moûts obtenus sont modifiées, avec un potentiel alcoolique supérieur à 14 %, un profil aromatique différent et un pH plus élevé (van Leeuwen and Darriet 2016).

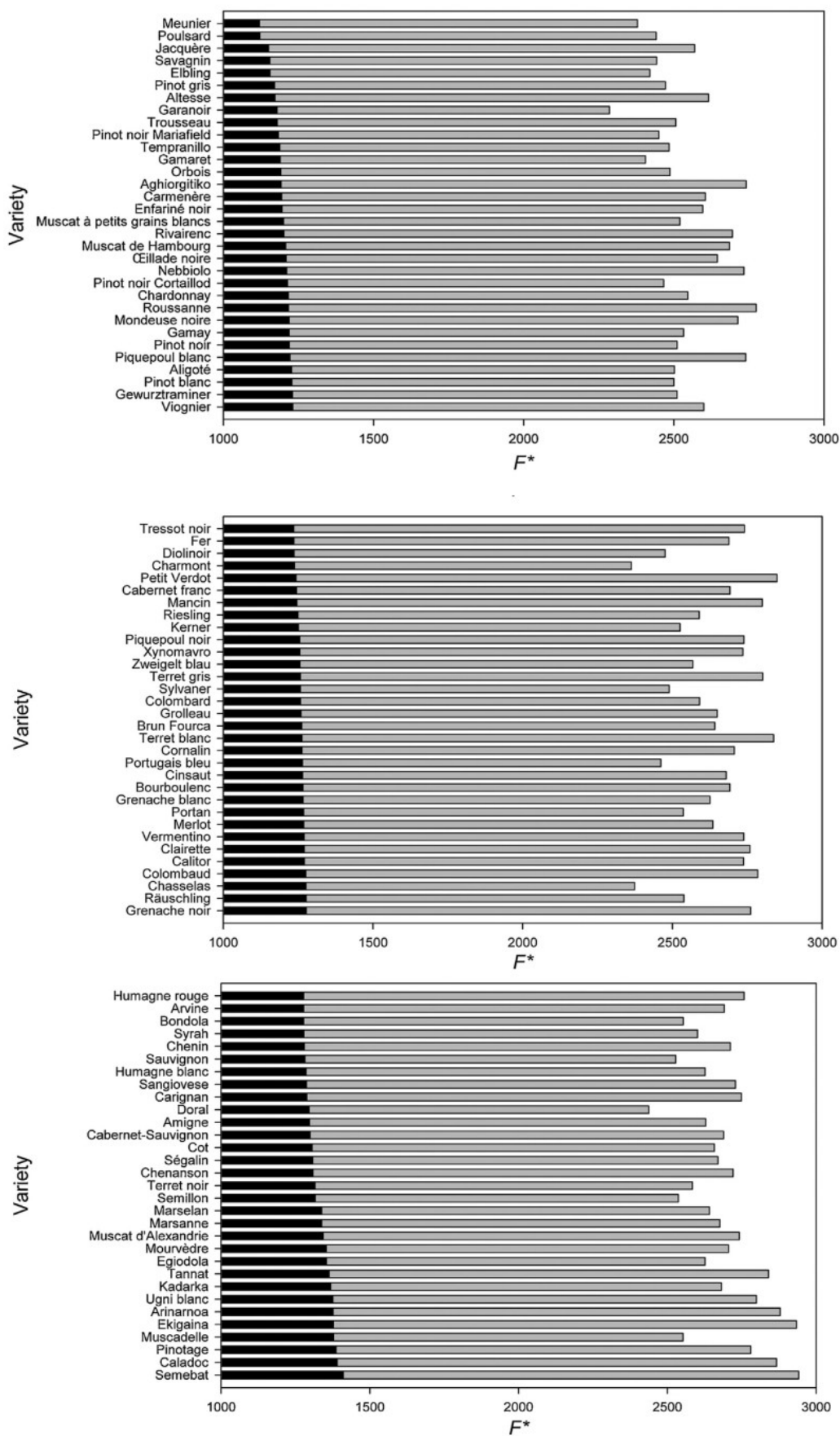


Figure 6: Dates relatives de floraison et véraison de différents cépages (Parker et al, 2013)

1 – 4. Quelques alternatives pour s'adapter aux effets du changement climatique

Dans ce contexte de changement climatique, la résilience et la performance des cultures sont importantes pour que la filière viticole perdure dans le temps. Afin d'améliorer la viticulture dans ce cadre, trois grandes pistes d'améliorations sont actuellement étudiées : l'utilisation de matériel végétal adapté, l'utilisation des symbioses avec des bactéries ou champignons symbiotiques et l'adaptation des pratiques viticoles (del Pozo *et al.* 2019).

Utilisation de matériel végétal adapté au changement climatique

Il existe une grande variabilité génétique au sein de *Vitis vinifera*, ce qui explique la diversité des cépages. Cette diversité entraîne des qualités organoleptiques originales, mais aussi des comportements différents face à certains types de stress (biotiques ou abiotiques). La diversité du genre *Vitis* est importante pour la diversité des portes-greffes qui ont leur importance dans la survie des ceps. Il serait intéressant d'utiliser les cépages et les portes-greffes adaptés aux nouvelles conditions climatiques. Voici quelques facteurs à prendre en compte dans l'utilisation de matériel adapté.

Les cycles phénologiques sont de plus en plus précoces dans le cadre du changement climatique. Pour pallier à cet effet, l'utilisation de cépages tardifs apparaît comme une alternative. L'étude de Parker *et al.* (2013) a permis de classer les cépages selon leurs dates de floraison et de véraison à l'aide du modèle Grapevine Flowering Véraison (modèle GFV) (Figure 6). Ce modèle utilise la somme des températures pour prédire la date de floraison et véraison (Parker *et al.* 2011). L'étude de 2013 permet de connaître l'ordre relatif d'apparition de la floraison dans l'année (Figure 6). Cependant, les auteurs ont souligné que des cépages n'ont pas le même ordre de floraison que de véraison (Parker *et al.* 2013). Ce genre de classification permet d'identifier les cépages plus tardifs dans le but de retarder le cycle végétatif de la vigne, comme le Muscat d'Alexandrie, le Mourvèdre, et le Cabernet-Sauvignon. Si les cépages tardifs n'est pas la solution de lutte unique contre les effets du changement climatique, ils participent tout de même à en atténuer les conséquences sur le vin (Parker *et al.* 2013).

Les cépages ont différentes tolérances aux déficits hydriques : on parle de cépages isohydriques et anisohydriques (Duchene 2016). La première catégorie est capable de maintenir un potentiel hydrique élevé de jour et sous contrainte hydrique (ex. : Lambrusco, Mante Negro et Sangiovese (Chaves *et al.* 2010)), alors que la seconde, ne le maintient pas (Duchene 2016) (ex. : Chardonnay, Syrah, Riesling (Chaves *et al.* 2010)). Dans la conception des vignobles adaptés au changement climatique, il serait donc intéressant de prendre en compte ce facteur. De même, pour parer aux effets indésirables de la baisse de l'acidité des baies entraînée par la hausse des températures, il serait intéressant d'utiliser des cépages qui ont un ratio acide tartrique/acide malique élevé (Marguerit *et al.* 2012). En effet, si la concentration de l'acide malique est dépendante de la température, la concentration en acide tartrique reste constante dans la baie tout au long de son développement (Marguerit *et al.* 2012). Ainsi, si des cépages ont des baies avec une

Tableau 1: Résistance des portes-greffes au stress hydrique selon différentes échelles (Serra et al 2014)

Name	Crossing	Samson and Castéran	Fregoni	Carbonneau
110R	<i>V. rupestris</i> × <i>V. cinerea</i> var. <i>helleri</i> 'Resseguier#2'	Good	High resistance	High resistance
140Ru	<i>V. rupestris</i> × <i>V. cinerea</i> var. <i>helleri</i> 'Resseguier#2'	Average	High resistance	High resistance
44-53M	<i>V. riparia</i> × <i>V. cordifolia</i> - <i>V. rupestris</i>	Good	High resistance	High resistance
1103P	<i>V. rupestris</i> × <i>V. cinerea</i> var. <i>helleri</i> 'Resseguier#2'	Good	High resistance	Resistance
SO4	<i>V. riparia</i> × <i>V. cinerea</i> var. <i>helleri</i> 'Resseguier#2'	Weak	Weak resistance	Resistance
99R	<i>V. rupestris</i> × <i>V. cinerea</i> var. <i>helleri</i> 'Resseguier#2'	Average	Average resistance	Resistance
3309C	<i>V. riparia</i> × <i>V. rupestris</i>	Good	Weak resistance	Sensitive
420A MGt	<i>V. riparia</i> × <i>V. cinerea</i> var. <i>helleri</i> 'Resseguier#2'	Weak	Weak resistance	Sensitive
Fercal	<i>V. cinerea</i> var. <i>helleri</i> 'Resseguier#2' × <i>Vinifera</i>	Average		Sensitive
5BB	<i>V. riparia</i> × <i>V. cinerea</i> var. <i>helleri</i> 'Resseguier#2'	Bad	Weak resistance	Sensitive
161-49C	<i>V. riparia</i> × <i>V. cinerea</i> var. <i>helleri</i> 'Resseguier#2'	Weak	Mid resistance	Sensitive
41B MGt	<i>V. cinerea</i> var. <i>helleri</i> 'Resseguier#2' × <i>V. vinifera</i>	Average	High resistance	Sensitive
Rupestris du Lot	<i>V. rupestris</i>	Bad	Weak resistance	Sensitive
101-14 Mt	<i>V. riparia</i> × <i>V. rupestris</i>	Bad	Weak resistance	Very sensitive
Riparia Gloire de Montpellier	<i>V. riparia</i>	Bad	Weak resistance	Very sensitive
333EM	<i>V. cinerea</i> var. <i>helleri</i> 'Resseguier#2' × <i>V. vinifera</i>	Good	Mid resistance	Very sensitive

forte concentration en acide tartrique, cela pourrait compenser la baisse de concentration en acide malique.

L'adaptation du matériel végétal ne concerne pas que la partie aérienne de la vigne, mais aussi la partie souterraine. Ainsi, les portes-greffes sont choisis pour leur capacité de greffage et leur vigueur, mais aussi par rapport à leurs facultés à s'enraciner, et leurs tolérances au phylloxéra, aux sols calcaires et salins (Serra *et al.* 2014). De même que les cépages, les portes-greffes ont une variabilité génétique qui leur permet une forte adaptabilité à leur environnement. Dans le cadre des sécheresses, des études ont classé les portes-greffes selon leur tolérance (Serra *et al.* 2014). Cependant, selon les conditions expérimentales et les méthodes d'évaluation des caractères, un même porte-greffe n'a pas la même résistance hydrique (Tableau 1) (Serra *et al.* 2014). Plusieurs études ont montré que les portes-greffes permettaient à la vigne de répondre au stress hydrique, alors qu'en conditions optimales, le porte-greffe n'a aucun effet sur la réponse de la plante (Serra *et al.* 2014). Afin de sélectionner le porte-greffe idéal, il est donc important de prendre en compte de nombreux facteurs tels que le sol et le climat, en plus de la sécheresse.

Utilisation des symbioses fonctionnelles

Certains champignons sont capables de mettre en place une symbiose avec les racines des végétaux. Ce processus est appelé mycorhize. La symbiose ainsi formée permet à la plante d'avoir accès à l'eau et aux nutriments auxquels elle n'a pas accès seule. En échange, le champignon obtient les glucides produits par la plante (Donkó *et al.* 2014; Trouvelot *et al.* 2015). Des études ont permis de mettre en évidence plusieurs genres de champignons qui colonisent la vigne et qui appartiennent à la famille *Glomeraceae* : *Glomus*, *Rhizophagus*, *Funneliformis* et *Claroideoglomus* (Trouvelot *et al.* 2015).

Les champignons colonisent les racines et forment des arbuscules avec des embranchements dichotomiques invaginés au niveau de la membrane cellulaire racinaire, afin de maximiser les interactions entre le champignon et le végétal (Donkó *et al.* 2014). En cas de sécheresse, les sols sont plus durs, l'eau et les nutriments sont moins accessibles pour la plante. Les mycorhizes étendent la surface d'échange entre le sol et les racines, ce qui permet d'avoir accès à des ressources normalement inaccessibles pour la plante (Trouvelot *et al.* 2015). Plusieurs études ont montré que les mycorhizes élèvent la concentration en proline dans le cas d'une sécheresse (Valentine *et al.* 2006; Trouvelot *et al.* 2015). Or, la proline est un amino-acide qui a plusieurs fonctions dans les mécanismes de défense face aux stress environnementaux (Szabados and Savouré 2010). Ainsi, les plantes mycorhizées montrent une meilleure conductance stomatique avec une meilleure utilisation de l'eau (Valentine *et al.* 2006).

L'inoculation des jeunes plantes avec des champignons mycorhiziens augmente le nombre de champignons mycorhiziens autour des racines et améliore le développement des jeunes plantes (Donkó *et al.* 2014). Si les mycorhizes améliorent la tolérance de la vigne en condition de sécheresse, ce ne sont pas les mycorhizes qui permettront de lutter entièrement contre les effets des changements climatiques. Cette pratique doit venir en complément d'autres solutions.

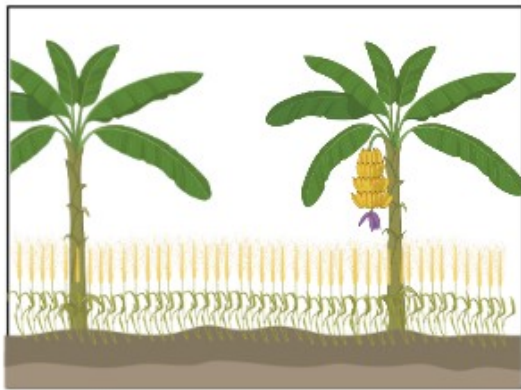
Vers de nouvelles pratiques culturales

Le manque d'eau étant un problème qui deviendra récurrent dans un contexte de changement climatique, l'irrigation apparaît alors comme une alternative (Cifre *et al.* 2005). Des études ont montré que l'irrigation, si elle est faible, permet de maintenir voire d'améliorer les rendements, mais aussi la qualité des baies (Chaves *et al.* 2010). Elle peut cependant conduire à un développement végétatif excessif, entraînant une baisse de concentration en pigments, un déséquilibre au niveau des acides et une augmentation de la surface foliaire (Cifre *et al.* 2005; Chaves *et al.* 2010). Or, une plus grande surface foliaire peut entraîner un risque plus élevé d'être en contact avec des maladies (Chaves *et al.* 2010).

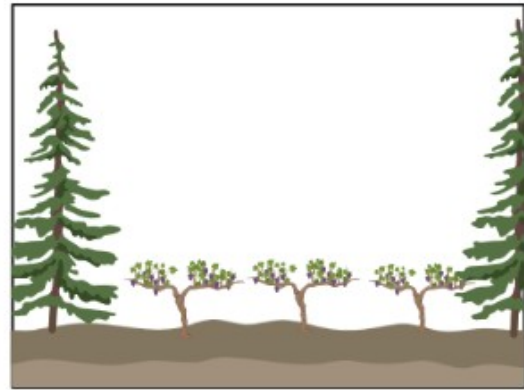
L'irrigation peut se décliner en deux catégories : l'irrigation déficitaire régulée et la sécheresse partielle de la zone racinaire (Chaves *et al.* 2010). La première technique consiste à irriguer durant certaines étapes du cycle phénologique, tandis que la seconde consiste à apporter de l'eau à une partie du système racinaire et maintenir l'autre partie en état de sécheresse (Chaves *et al.* 2010). Ces deux pratiques possèdent des inconvénients. Dans le premier cas, il faut bien contrôler l'apport d'eau (Chaves *et al.* 2007), sinon les effets négatifs rapportés plus hauts auront lieu. La deuxième technique présente des difficultés de mise en place et une variabilité des effets en fonction des conditions environnementales (Chaves *et al.* 2007). L'irrigation apparaît alors comme une alternative qui n'est pas durable (Naulleau *et al.* 2021). En effet, l'eau est une ressource qui devient rare et contrôlée, surtout en période de sécheresse. De plus l'utilisation de l'irrigation fait débat dans le monde viticole et n'est pas toujours autorisée par les appellations et leurs cahiers des charges.

La taille peut être un moyen de retarder les effets du changement climatique, notamment la taille tardive et la taille en gobelet. La taille tardive consiste à tailler les rameaux de l'année N, lorsqu'à lieu le débourrement de l'année N+1 (Perin *et al.* 2023). Cette méthode retarde la phénologie de la vigne sur l'année et minimise les effets des hautes températures, même au niveau du jus et du moût (Perin *et al.* 2023). Plusieurs études ont montré qu'il s'agit d'un moyen de protéger les bourgeons lors des gelées tardives (Poni *et al.* 2022; Ferrara *et al.* 2022). Cependant, cette pratique affaiblit la vigueur de la vigne, ce qui n'en fait pas une alternative durable. La taille en gobelet est largement pratiquée dans le bassin méditerranéen : France, Espagne, Italie et Grèce (Santesteban 2020). Ce mode de conduite permet une aération des baies et une protection contre le vent (Santesteban 2020). L'ombre portée des ceps ainsi taillés diminue leur besoin en eau et l'évaporation au sol (Santesteban 2020).

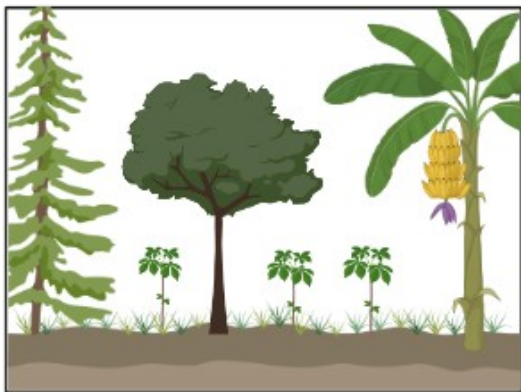
Pour le moment, puisque les cahiers des charges n'autorisent pas l'utilisation de cépages et de porte-greffes adaptés et que l'irrigation n'est pas une alternative durable, l'agroécologie apparaît comme une alternative envisageable pour lutter contre les effets du changement climatique (Aguilera *et al.* 2020). C'est une pratique très ancienne dans le bassin méditerranéen et qui est en pleine expansion (Aguilera *et al.* 2020). L'agroécologie est définie comme « l'application de concepts et de principes écologiques, lors de la conception et de la conduite d'agrosystèmes durables, ou comme étant la science de l'agriculture durable » (Gliessman 2018). Il y a eu de nombreuses définitions pour ce concept, mais elles ont en commun de vouloir la préservation des



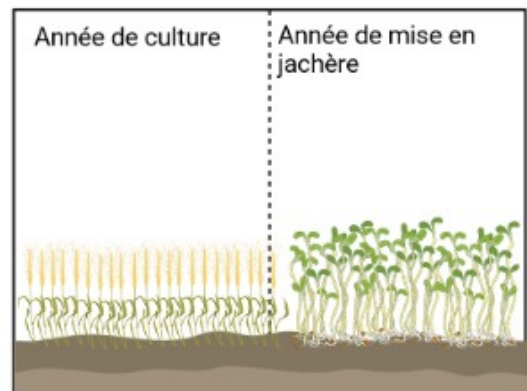
(A) : Culture sous couvert arboré



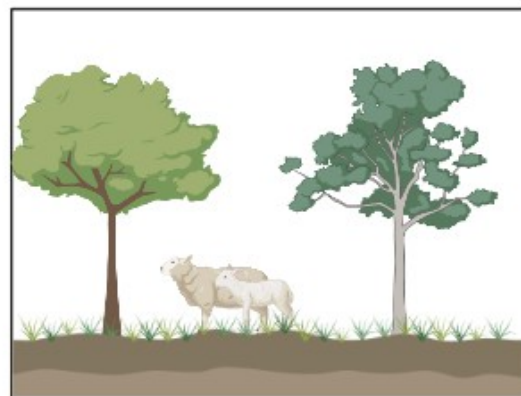
(B) : Disposition linéaire



(C) : Agro-forêt



(D) : Technique séquentielle



(E) : Technique mineure (ex.: association arbre-animal)

Figure 7: Les différents types d'aménagements agroforestiers (créé avec BioRender)

ressources naturelles (Wezel *et al.* 2009) et de prendre en compte les interactions entre la culture et son environnement. L'agroécologie est associée à une diversification des cultures (Aguilera *et al.* 2020), ce qui améliore leurs résiliences face aux changements qu'elles vont subir (Altieri *et al.* 2015). La diversité spécifique permet une indépendance des mono-espèces, car plusieurs espèces peuvent aussi assurer une même fonction dans l'écosystème (Altieri *et al.* 2015).

L'ouragan Ike de 2008 et qui a frappé Cuba, est un bon exemple illustrant la résilience des cultures par l'agroécologie. Les fermes diversifiées ont subi une perte de 50 % sur leurs récoltes tandis que les fermes en monocultures ont perdu entre 90 % et 100 % de leurs récoltes (Altieri *et al.* 2015). De plus, les fermes diversifiées ont récupéré 80 % de leur culture, quarante jours après l'ouragan (Altieri *et al.* 2015).

1 – 5. L'agroforesterie : généralité et son lien avec le monde viticole

Généralités sur l'agroforesterie

Depuis les années 90, l'agroforesterie est étudiée comme une des alternatives au changement climatique. En 1993, Nair définit l'agroforesterie de la manière suivante : « système de management du territoire et des technologies, où les ligneux pérennes sont délibérément utilisés sur une même parcelle que les cultures agricoles et/ou animales, dans certaines formes d'arrangement ou de séquences temporelles. Dans les systèmes agroforestiers, on prend en compte à la fois les interactions économiques et écologiques entre les différents composants du système ». Les systèmes agroforestiers ont pu être classés en cinq catégories (Torquebiau *et al.* 2002) :

- Les cultures sous couverts arborés : strates arborées recouvrant les cultures. Les arbres sont disposés un peu partout dans les parcelles agricoles (Figure 7.A).
- La disposition linéaire : plantation des arbres en lisière de parcelle (Figure 7.B).
- Les agro-forêts : parcelles contenant une association multi-strates de plusieurs espèces arborées et saisonnières (Figure 7.C).
- Les techniques séquentielles : système agroforestier temporaire, par exemple sur une parcelle mise en jachère (Figure 7.D).
- Les techniques mineures : association animal/arbre (Figure 7.E).

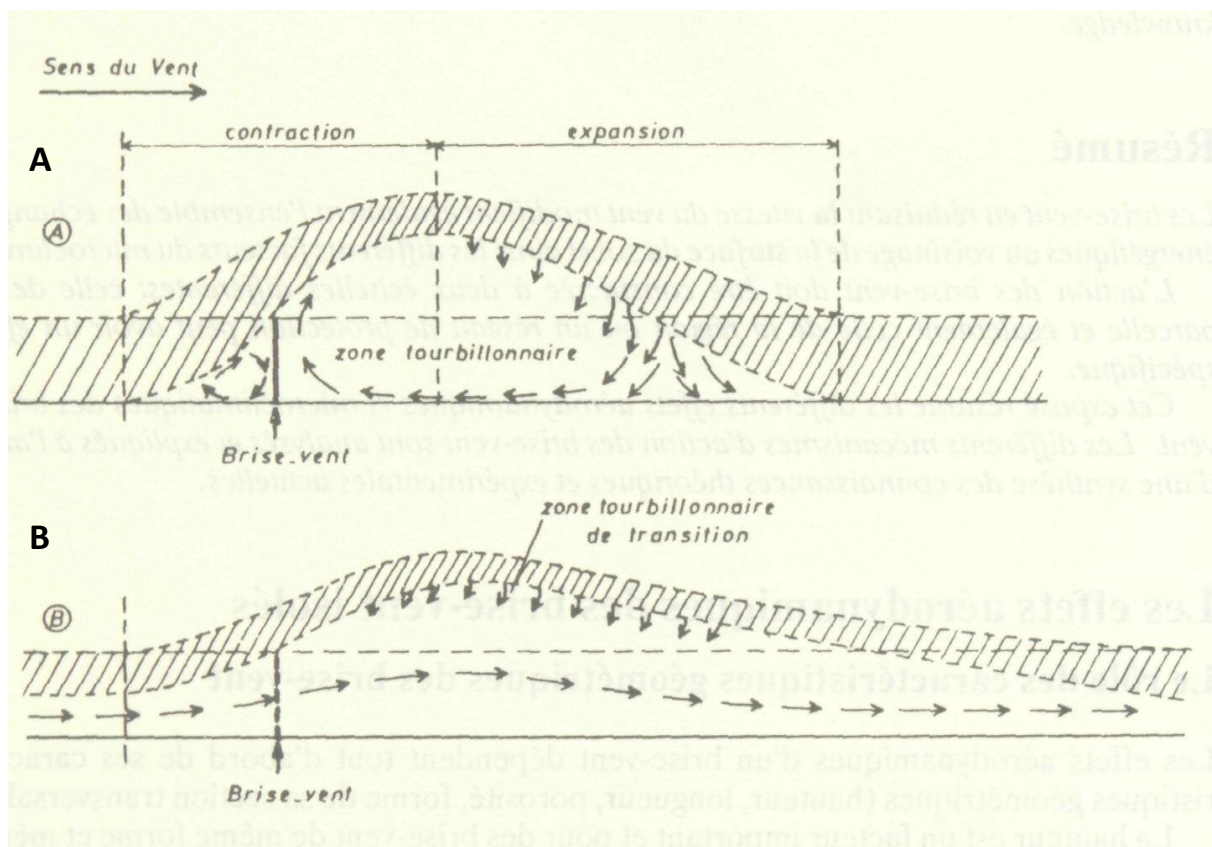


Figure 8: Aérodynamisme du vent, en amont et en aval d'une haie imperméable (A) ou perméable (B) (Guyot 1983)

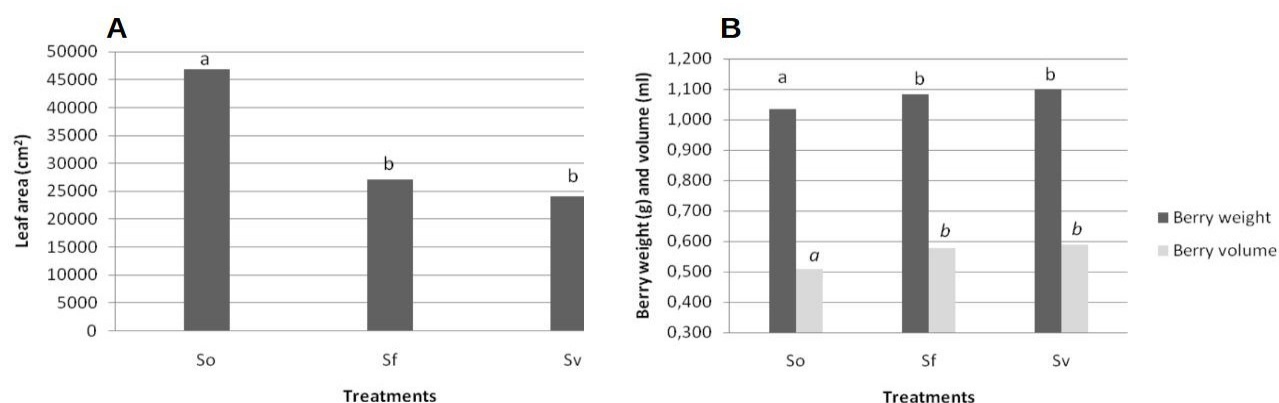


Figure 9: Effet de l'ombrage sur la surface des feuilles (A), et le volume et poids des baies (B). S0 : pas d'ombrage; Sf : ombrage de la floraison à la maturité; Sv : ombrage de la véraison à la maturité (Oliveira, Barbosa et Olazabal, 2011)

L'agroforesterie, un moyen de lutter contre les effets négatifs du changement climatique

Les arbres ou les haies sont des obstacles pour le vent, qui doit les contourner (Trambouze and Goma-Fortin 2018). Le vent passe alors par-dessus et un tourbillon se crée en aval (Figure 8.A) (Guyot 1983). Ce tourbillon entraîne plusieurs conséquences. Tout d'abord, selon la hauteur de l'obstacle, il se forme plus ou moins proche du sol. Plus un obstacle est grand et plus le tourbillon se forme haut, et n'a pas d'effet sur la végétation. La densité de la haie a un effet très important sur l'aérodynamisme du vent. En effet, si elle est imperméable, c'est-à-dire que le vent ne peut pas passer au travers (comme une haie très dense), l'air est totalement dévié vers le haut, et se rabat en aval à une distance de cinq à six fois sa hauteur (Figure 8.A) (Guyot 1983), mais l'air va dans tous les sens ce qui peut abîmer la végétation et assécher le sol (Guyot 1983). *A contrario*, les obstacles perméables, laissent passer le vent au travers d'eux, tout en ayant une partie qui est déviée (Figure 8.B). Cela empêche la formation de tourbillon en aval, ce qui abîme moins les cultures (Guyot 1983), la vitesse du vent est tout de même un peu plus forte qu'avec une haie imperméable, mais la réduction de la vitesse se fait sentir sur une plus grande distance en aval (Guyot 1983). Les travaux de Guyot (1983) concluent que les haies perméables sont plus favorables à l'agroforesterie, car la déviation du vent fait moins de dégâts. L'utilisation de haies est courante dans le sud de la France, afin de protéger les vignes et les autres cultures du mistral.

Les aménagements paysagers apportent de l'ombrage, diminuant les températures lors des périodes estivales (Fulchin 2018; Bourgade *et al.* 2020). Sans ombrage, les feuilles sont plus exposées aux fortes lumières et à une plus forte évapotranspiration. Une étude a montré que l'ombrage pouvait réduire l'évapotranspiration de 50 % chez le pommier (Neri *et al.* 2003). L'étude de Oliveira *et al.* (2011) a montré que l'ombrage rendait la surface foliaire plus petites (Figure 9.A), que les baies avaient un volume et une masse plus grande (Oliveira *et al.* 2011) (Figure 9.B), et le nombre de grappes par cep n'est pas différent significativement. Plusieurs études ont montré que l'ombrage au niveau du sol permettait de diminuer l'évaporation au niveau du sol et donc de mieux maintenir l'eau dans le sol (Williams and Ayars 2005).

L'agroforesterie apporte de la biodiversité au sein et autour des parcelles. Comme expliqué plus haut, cette biodiversité améliore la résilience de l'agrosystème (Altieri *et al.* 2015), apporte et maintient des auxiliaires de cultures à proximité (Pumariño *et al.* 2015). Ils permettent ainsi de lutter durablement contre les nuisibles, mais aussi d'utiliser moins de produits phytosanitaires.

Quels sont les freins de l'agroforesterie pour les viticulteurs ?

L'agroforesterie apparaît comme un avantage dans un contexte méditerranéen, mais ses désavantages peuvent être considérés comme des freins pour les viticulteurs. En effet, les haies et les arbres représentent une compétition pour les ressources du sol : eau, azote, potassium, phosphore.

La présence des aménagements agroforestiers permet d'apporter des auxiliaires, mais leur effet positif dépend du contexte agroforestier (Pumariño *et al.* 2015). En effet, les arbres peuvent apporter un micro-climat favorable au développement des maladies et des nuisibles (Pumariño *et al.* 2015), mais aussi améliorer les ressources en nutriments de la plante, ce qui peut favoriser l'installation d'espèces parasites (Pumariño *et al.* 2015) et augmenter le risque d'apparition de maladies.

Une étude a identifié la perception de l'agroforesterie des agriculteurs dans sept pays d'Europe (Graves *et al.* 2008). Même si les agriculteurs perçoivent des points positifs (amélioration de la biodiversité et de l'aménagement paysager), le principal frein à l'agroforesterie est la complexité de travail que cela apporte ainsi que la difficulté à mécaniser cette pratique (Graves *et al.* 2008). L'agroforesterie peut aussi être associée à une baisse de productivité et donc une baisse de revenu pour les exploitations agricoles (García de Jalón *et al.* 2018). Mais la baisse de productivité peut être compensée par la production de bois et donc générer un nouveau revenu. La perte de rendement de la culture principale est-elle compensée par la vente des produits agroforestiers ? C'est une question à laquelle doivent réfléchir les agriculteurs avant de mettre en place un système agroforestier (García de Jalón *et al.* 2018).

1 – 6. Le projet VITAM : étudier l'effet de l'agroforesterie sur les caractéristiques agronomiques de la vigne

Jusqu'à aujourd'hui, les effets de l'agroforesterie ont été étudiés sur des grandes cultures et pour le moment, peu de données ont été récoltées sur le vignoble. En 2021, AGROOF, une société française coopérative et participative, spécialisée dans le développement des systèmes agroforestiers, a lancé le projet VITAM (VITiculture et Agroforesterie en Méditerranée). Ce projet a pour but de faciliter le développement de l'agroforesterie viticole en zone méditerranéenne, par la création de références techniques, économiques et agronomiques. Le projet se divise en quatre actions :

1. Réaliser un référentiel technico-économique sur l'installation et la gestion des systèmes agroforestiers viticoles (Action 1).
2. Améliorer les connaissances sur l'effet des aménagements agroforestiers sur les performances agronomiques de la vigne (Action 2).
3. Réaliser un réseau d'expérimentation participative avec la co-conception de sites pilotes (Action 3).
4. Diffuser l'accès aux résultats du projet (Action 4).

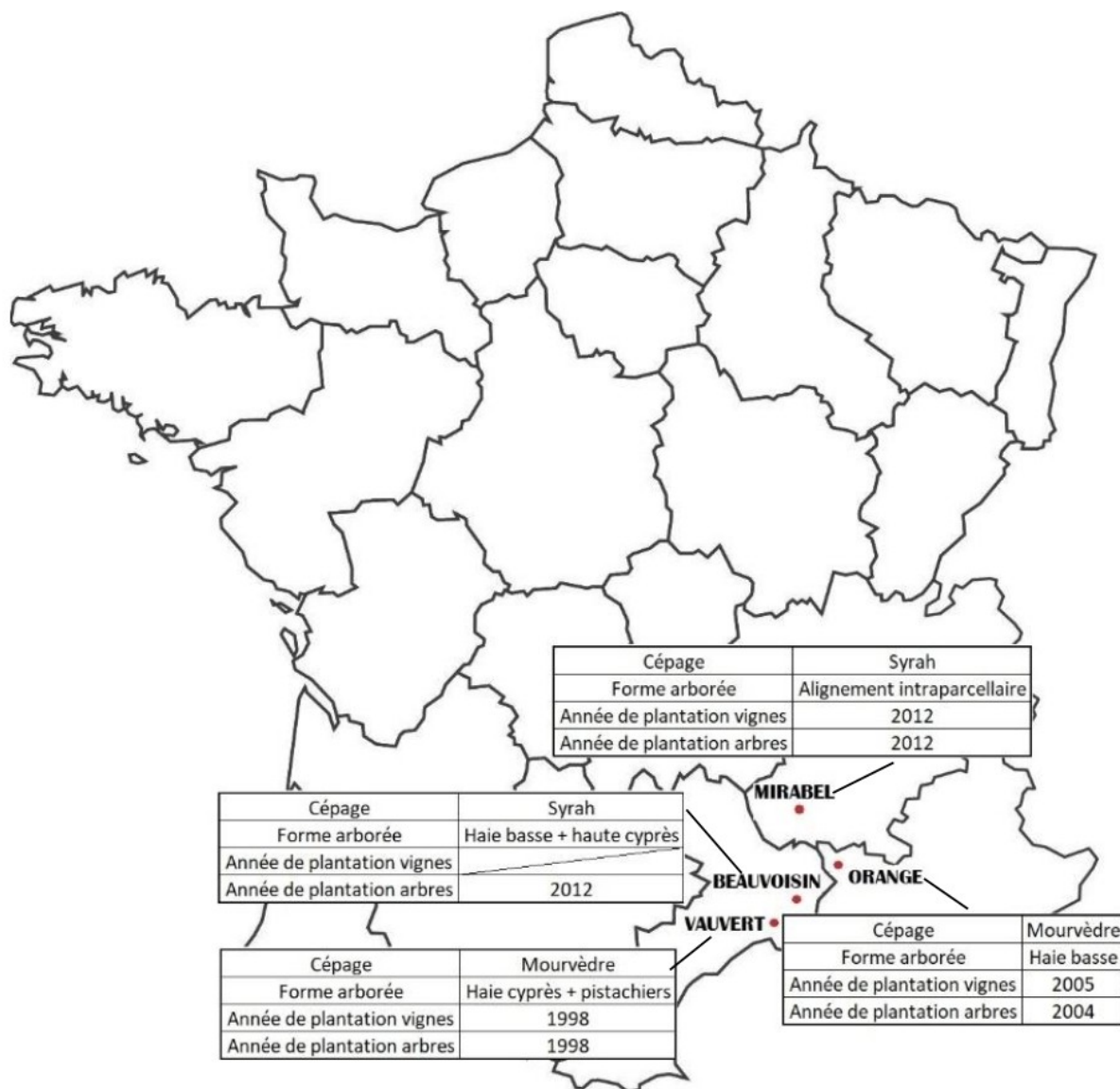


Figure 10: Les sites du projet et leurs caractéristiques (Mémoire de stage de Clara Bertrand, 2022)

Le projet VITAM est possible grâce à 8 partenaires : AGROOF SCOP, les chambres d'Agricultures de l'Hérault (34), de Vaucluse (84) et d'Ardèche (07), l'UMR ABSYS de l'INRAE, l'EPLEFPA Oliviers de Serres – Ferme du Pradel, le Syndicat des Côtes du Rhône et enfin l'Institut Français de la Vigne et du Vin.

Il se déroule sur quatre sites : Mirabel (07), Orange (84), Vauvert (30) et Beauvoisin (30). Chaque site expérimental cherche à collecter des informations sur des systèmes agroforestiers différents (Figure 10) :

- Site de Mirabel : évaluer l'effet d'une haie intraparcellaire.
- Site d'Orange : évaluer l'effet d'une haie basse diversifiée.
- Site de Vauvert : évaluer l'effet d'une haie brise-vent. diversifiée
- Site de Beauvoisin : évaluer l'effet d'une haie basse diversifiée, combinée à une haie haute de cyprès.

Ce stage à la Chambre d'Agriculture de Vaucluse, dans l'équipe viticulture, se place dans l'action 3 du projet. Les mesures de l'essai ont été réalisées sur un site pilote du projet qui se trouve à Orange. Son but est d'observer l'effet d'une haie sur un vignoble dans un contexte de climat méditerranéen. Pour cela, plusieurs paramètres sont pris en compte : la phénologie, la croissance de la vigne, le micro-climat et l'état hydrique du sol. Ces suivis se déroulent sur deux années : 2022 et 2023. Une comparaison des résultats 2022 et 2023 fera l'objet de la discussion de ce mémoire.

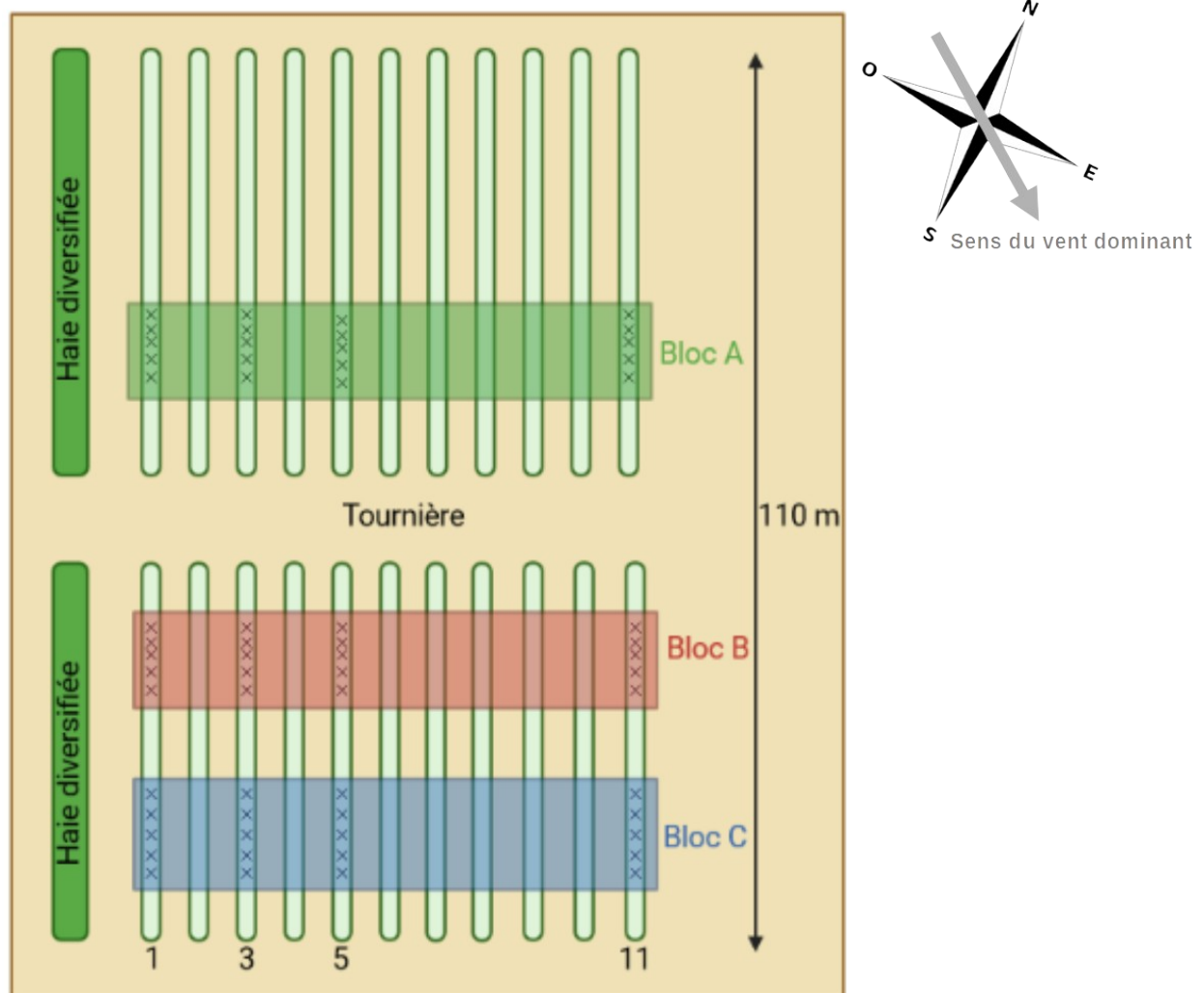


Figure 11: Présentation du site expérimental (créé avec BioRender)

2. Matériel et méthode

2 – 1. Cartographie de la parcelle

Une cartographie de la parcelle d'étude a été réalisée, afin de déterminer les ceps qui seront étudiés dans la suite de l'essai. En effet, certains sont affectés par des maladies du bois, donc certains pieds qui ont été étudiés lors de l'essai de 2022 ne sont plus étudiables en 2023. Pour chaque pied, il a été déterminé s'il était vivant, mort, manquant, avec un seul bras, ou s'il était jeune. Le but de cette cartographie est d'échantillonner les pieds qui seront suivis dans le reste de l'étude. Les pieds ne doivent pas être à côté des ces ceps car cela changerait la compétition qu'il y a entre eux. C'est pourquoi il est important de réaliser cette carte afin de déterminer les pieds intéressants.

Les rangs étudiés pour cette étude sont : le rang 1 (2 m de la haie), le rang 3 (6 m), le rang 5 (10 m) et le rang 11 (22 m) (Figure 11). Ce dernier est le témoin, c'est-à-dire qu'il est considéré comme n'étant pas sous l'influence de la haie.

Chaque rang est divisé en trois parties (appelées « bloc »), afin d'avoir trois répétitions dans chaque rang. Il y a un bloc au nord du rang (Bloc A), un bloc au centre du rang (Bloc B) et un bloc au sud du rang (Bloc C) (Figure 10).

Le terme de « placette » désigne un ensemble de cinq pieds qui appartiennent à la fois au même rang et au même bloc. Ce qui signifie quinze pieds par rang. Au total, sur cette parcelle, soixante pieds sont examinés.

2 – 2. Caractéristiques de la parcelle

Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est du Mourvèdre, avec comme porte-greffe le 3309 C. Il a été planté en 2005 (18 ans), selon l'orientation nord-sud.

Conduite de la parcelle

La parcelle appartient au lycée professionnel viticole de Orange Château Mongin, sous l'appellation Côtes du Rhône Villages et sous conduite Agriculture Biologique. Les pieds sont taillés en cordon de Royat, c'est-à-dire six coursons répartis sur deux bras. C'est une parcelle qui subit les effets du mistral et des fortes chaleurs. Elle est séchante, ce qui en fait une parcelle représentative du climat méditerranéen, avec une haie à proximité.

La haie

La haie est basse (1,6 m) et a été plantée en 2004 (19 ans), et contient 16 essences différentes (Annexe 1) : arbres à perruques (*Cotinus coggygria*), genévrier cade (*Juniperus oxycedrus*), romarin (*Salvia rosmarinus*), *Piracantha*, arbousier (*Arbutus unedo*), coronille de Valence (*Coronilla valentina*), filaire à feuilles étroites (*Phillyrea angustifolia*), laurier-sauce (*Laurus nobilis*), laurier rose (*Nerium oleander*), laurier tin (*Viburnum tinus*), germandrée arbustive (*Teucrium fruticans*), viorne (*Viburnum*), buis (*Buxus*), grenadier (*Punica*), myrte (famille des *Myrtaceae*), buplèvre (*Bupleurum*).

La haie a été plantée dans le but de valoriser le paysage, d'apporter de la biodiversité et de protéger la parcelle contre les vents, dont le mistral.

2 – 3. Suivis de la phénologie

Les suivis phénologiques ont été réalisés lors des stades suivants : débourrement, floraison et véraison.

Débourrement

Au débourrement, chaque bourgeon de chaque pied a été catégorisé selon son stade de développement, d'après l'échelle de *Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische* (BBCH) (Annexe 2). Les bourgeons étaient donc à l'état de repos d'hiver (BBCH 00), ou dans le coton (BBCH 05), ou avec la pointe verte (BBCH 09), ou en éclatement (BBCH 10) ou encore avec 2 à 3 feuilles étalées (BBCH 12-13).

Floraison

Lors de la floraison, chaque grappe de chaque pied de chaque bloc a été observée et catégorisée selon l'échelle BBCH.

Véraison

À véraison, 20 baies par cep ont été palpées et ont été catégorisées comme soit molles, soit dures.

2 – 4. Suivi de la croissance

Tout au long des suivis, les stades phénologiques majoritaires des rangs ont été notés, afin d'observer s'il y a un décalage des stades phénologiques entre les rangs.



Figure 12: Statut des apex (Pichon 2021)

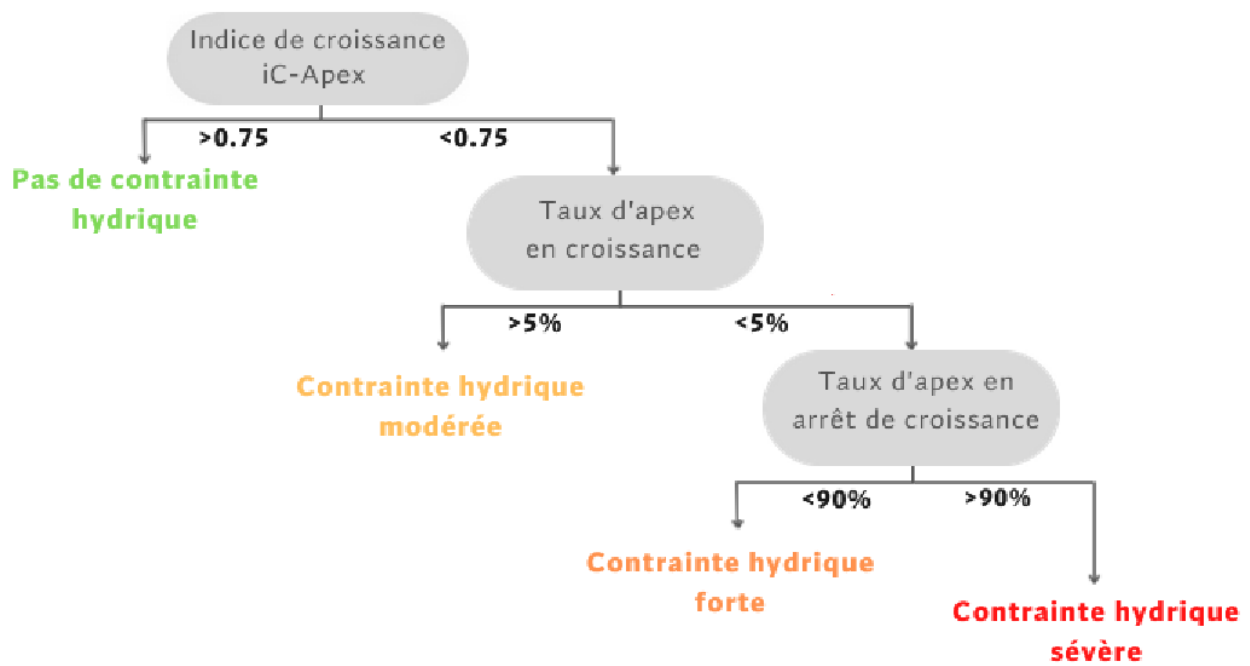


Figure 13: Contrainte hydrique de la vigne en fonction de son index de croissance (Institut Rhodanien)

Mesure des rameaux

Les mesures ont été effectuées au stade 8-10 feuilles, avant la floraison. Pour chaque cep, le nombre de rameaux a été compté. Pour chaque rameau, sa taille a été mesurée à l'aide d'un décimètre.

Suivi de l'apex

La mesure des apex s'est faite sur les mois de juin à août de manière hebdomadaire. Pour chaque pied, 10 apex sont observés. La position de l'apex par rapport aux dernières feuilles permet de savoir s'il est en pleine croissance (Figure 12.a), en croissance ralentie (Figure 12.b) ou en arrêt de croissance (Figure 12.c). Avec la formule suivante, on en déduit l'indice de croissance :

$$Indice_{croissance} = 2 \times \% \text{Pleine croissance} + 1 \times \% \text{Croissance ralentie} + 0 \times \% \text{Arrêt croissance}$$

À l'aide de l'indice de croissance, il est possible de déterminer la contrainte hydrique de la plante (Figure 13).

Mesure de la masse surfacique

Pour chaque placette, un pied représentatif de la placette a été choisi. Sur ce pied, trente disques ont été découpés à l'aide d'un emporte-pièce en cuivre d'une surface de 3,1 mm². Les trente disques ont été pesés pour connaître la masse fraîche, puis mis à sécher à l'air libre pendant une semaine. Les masses sèches ont ensuite été mesurées. Le pourcentage de masse sèche a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Pourcentage masse sèche} = \frac{\text{Masse sèche}}{\text{Masse fraîche}} \times 100$$

2 – 5. Micro-climat de la vigne

Mesures de l'humidité et de la température au niveau des grappes

Pour caractériser le micro-climat des sondes de température et d'humidité (modèle Voltcraft DL-121TH) ont été placées dans chaque bloc des rangs 1 et 11. Elles ont été placées dans des abris de stations météo, au-dessus de la canopée au début du mois de mai et laissées pendant toute la durée de l'essai, car nous cherchons à caractériser le micro-climat créé par la haie. Leur programmation a été faite de la façon suivante : une mesure toutes les dix minutes de la température et de l'humidité relative de l'air. Les mesures des sondes ont été relevées régulièrement.

Tensiométrie du sol

Des tensiomètres ont été placés sur les rangs 1, 3 et témoin. Le relevé des tensiomètres a été fait deux fois par semaine pendant toute la durée du stage, d'avril à août. Cette mesure permet de connaître la disponibilité en eau dans le sol. Les valeurs varient entre 0 centibar/kPa et 199 centibar/kPa. Plus la valeur est élevée et plus le végétal doit fournir de l'énergie pour absorber l'eau du sol.

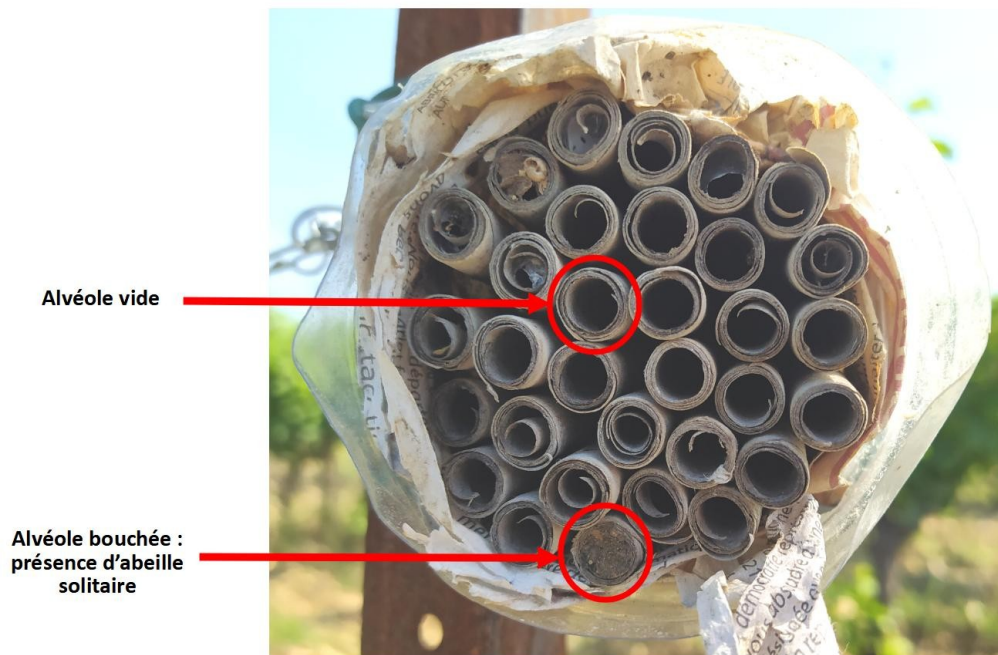


Figure 14: Nichoir à abeilles solitaires

2 – 6. Mesure de la teneur en chlorophylle

La mesure de la teneur en chlorophylle a été réalisée à l'aide d'un SPAD (SPAD-502 Plus) à véraison (Annexe 2). Pour chaque rang, il y a eu trois répétitions qui correspondent à une valeur moyenne de trente mesures réalisées sur 5 ceps. La teneur en chlorophylle est corrélée à la teneur en azote dans la feuille. Cela permet donc d'observer s'il y a une différence dans la teneur en azote entre les rangs et si la présence de la haie exerce une compétition pour l'azote.

2 – 7. Évaluation des maladies

Pour chaque cep appartenant à l'essai, la fréquence et l'intensité du mildiou et l'oïdium ont été notées. La fréquence a été déterminée en comptant le nombre de tâches de mildiou et d'oïdium sur feuille de chaque cep de l'essai. L'intensité a été mesurée en estimant la surface occupée sur la tâche sur la feuille.

2 – 8. Suivi de la biodiversité

Pour caractériser la biodiversité, plusieurs mesures ont été réalisées. Un enregistreur à chiroptères a été posé afin d'enregistrer leur présence. Il a été disposé au centre de la parcelle, à 1 m du sol. L'enregistreur a été programmé pour enregistrer entre 20h30 et 7h00, soit entre une heure avant le coucher du soleil et une heure après le lever du soleil. Les enregistrements ont été récupérés, renommés et découpés selon le protocole de l'Observatoire Agricole de la Biodiversité (OAB). Enfin, les fichiers ont été déposés sur le site : <https://vigiechiro.herokuapp.com>. Ce dernier a analysé les enregistrements sonores des fichiers et a retourné la liste contenant la liste des espèces probables présentes sur la parcelle.

Deux nichoirs à abeilles solitaires ont été posés plus tôt dans la saison en bordure de la parcelle : un à 2 m de la haie et un autre au niveau du rang témoin. Un relevé toutes les deux semaines à partir du mois de juin a été fait afin d'évaluer la présence des abeilles solitaires. La présence d'abeilles solitaires est déterminée par la fermeture des alvéoles des nichoirs (Figure 14).

2 – 9. Tests statistiques

Les tests statistiques ont été réalisés à l'aide de *Rstudio*. Comme il y avait une comparaison de plusieurs modalités entre elles, le principal test statistique utilisé est le test ANOVA. Lorsque ce test montre des différences entre les rangs, des analyses *post hoc* ont été réalisées : le test McTukey HSD a été utilisé afin de comparer les différences entre les modalités.

Données climatiques à Orange du 1er Avril au 15 Août 2023

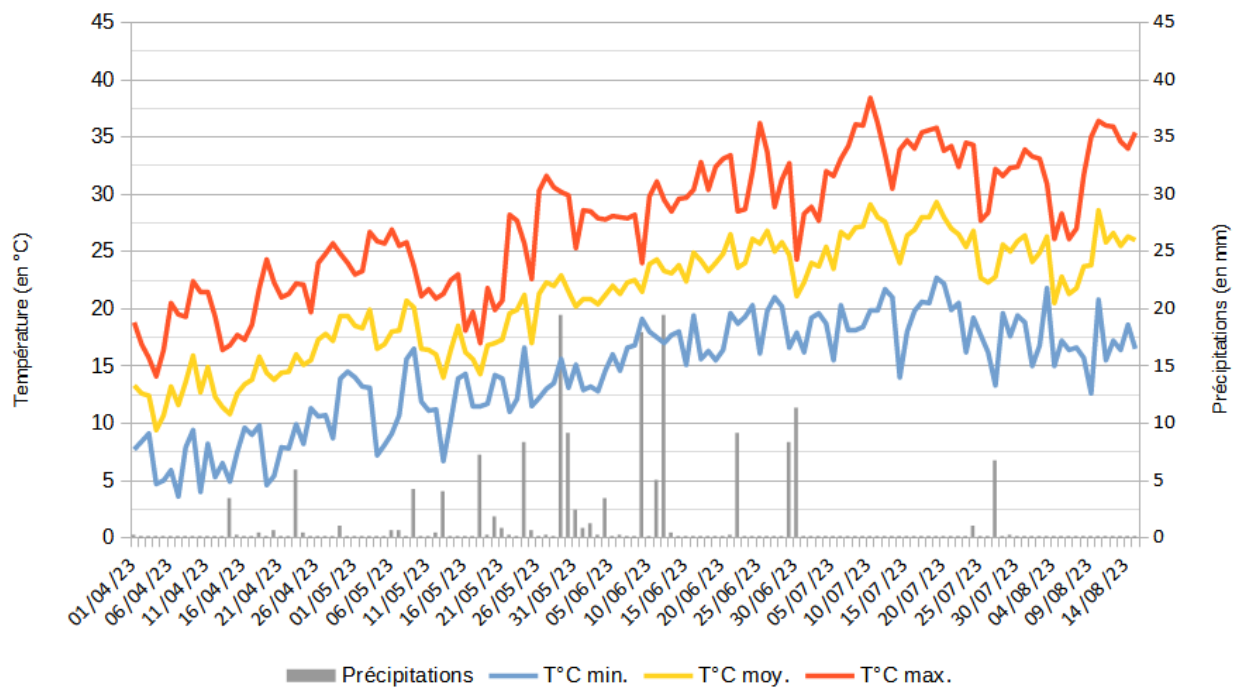


Figure 15: Climat de Orange, du 1er Avril au 15 Août 2023 (<https://www.meteo-concept.fr/>)

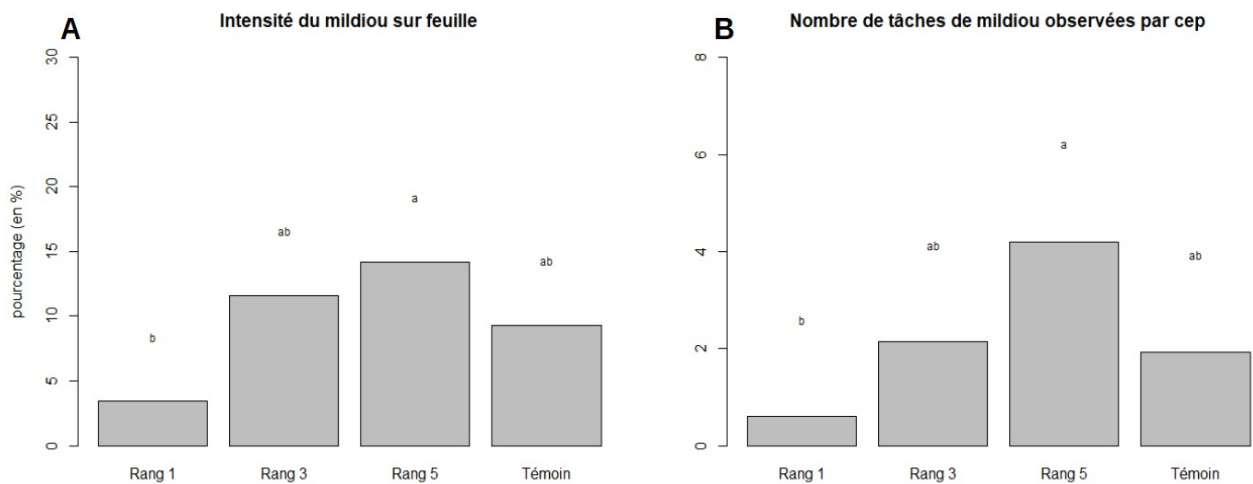


Figure 16: Nombre de tâches de mildiou observées et leur intensité (04/07/2023)

3. Résultats

3 – 1. Le climat 2022-2023

Les températures minimales, moyennes et maximales, ainsi que les précipitations du 01 avril 2023 au 15 août 2023 sont représentées en figure 15. Cette année est caractérisée par une importante fréquence des précipitations en mai et juin, comparé à 2022 (Figure 15 et Annexe 4). Les températures de cette année sont moins élevées que 2022, le seuil de 35°C est moins souvent franchi. Le cumul des précipitations de 2023 sur la période du 01 avril au 15 août est de 157,4 mm, tandis qu'il est de 93,5 mm pour 2022. Les températures moyennes des mois d'avril, mai, juin et juillet 2023 sont respectivement : 14,2°C, 18,4°C, 23,5°C et 25,9°C. Pour l'année 2022, les températures moyennes pour les mêmes mois sont respectivement : 13,7°C, 20,3°C, 24,9°C et 27,5°C.

3 – 2. Effet sur les maladies

Lors de la notation des maladies, il n'a été observé que du mildiou sur feuille et ainsi que des maladies du bois. Les résultats sont présentés en figure 16. En moyenne, il a été compté 0,6 tâches de mildiou sur le rang 1 ; 2,1 tâches sur le rang 3 ; 4,2 tâches sur le rang 5 et 1,9 tâches sur le rang témoin (Figure 16.B). Le rang 1 a significativement moins de tâches de mildiou que le rang 5 ($p\text{-value}<0,05$) (Figure 16.B). L'intensité du mildiou est 3,4 % au rang 1, 11,61 % au rang 3, 12,1 % au rang 5 et 9,3 % au rang témoin (Figure 16.A). Le rang 1 a une intensité de mildiou significativement plus faible que le rang 5 ($p\text{-value}<0,05$).

Tableau 2: Pourcentage de bourgeons représentés dans chaque classe de l'échelle BBCH.

Rang	BBCH 00	BBCH 05	BBCH 09	BBCH 10	BBCH12-13
Rang 1	19 % (a)	26 % (a)	21 % (a)	23 % (a)	10 % (a)
Rang 3	14 % (a)	56 % (a)	13 % (a)	11 % (b)	5 % (a)
Rang 5	11 % (a)	41 % (a)	19 % (a)	20 % (ab)	8 % (a)
Témoin	14 % (a)	48 % (a)	18 % (a)	18 % (ab)	3 % (a)

Tableau 3: Pourcentage de grappes représentés dans chaque classe de l'échelle BBCH.

Rang	BBCH 57	BBCH 60	BBCH 61	BBCH 62	BBCH 63	BBCH 64	BBCH 65	BBCH 66	BBCH 67	BBCH 68	BBCH 69
Rang 1	47,1 % (a)	8,0 % (a)	2,62 % (a)	2,9 % (a)	0 % (a)	4,42 % (a)	2,5 % (a)	2,5 % (a)	0 % (a)	9,2 % (a)	20,8 % (a)
Rang 3	57,6 % (a)	7,44 % (a)	6,42 % (a)	1,75 % (a)	2,36 % (ab)	3,31 % (a)	3,10 % (a)	0 % (a)	0,95 % (a)	5,7 % (a)	5,7 % (a)
Rang 5	63,3 % (a)	6,0 % (a)	2,52 % (a)	2,97 % (a)	0,67 % (b)	3,63 % (a)	0,67 % (a)	1,78 % (a)	0,67 % (a)	4,16 % (a)	13,6 % (a)
Témoin	56,6 % (a)	2,63 % (a)	5,81 % (a)	1,75 % (a)	5,83 % (b)	2,54 % (a)	7,14 % (a)	1,11 % (a)	2,65 % (a)	2,97 % (a)	11,0 % (a)

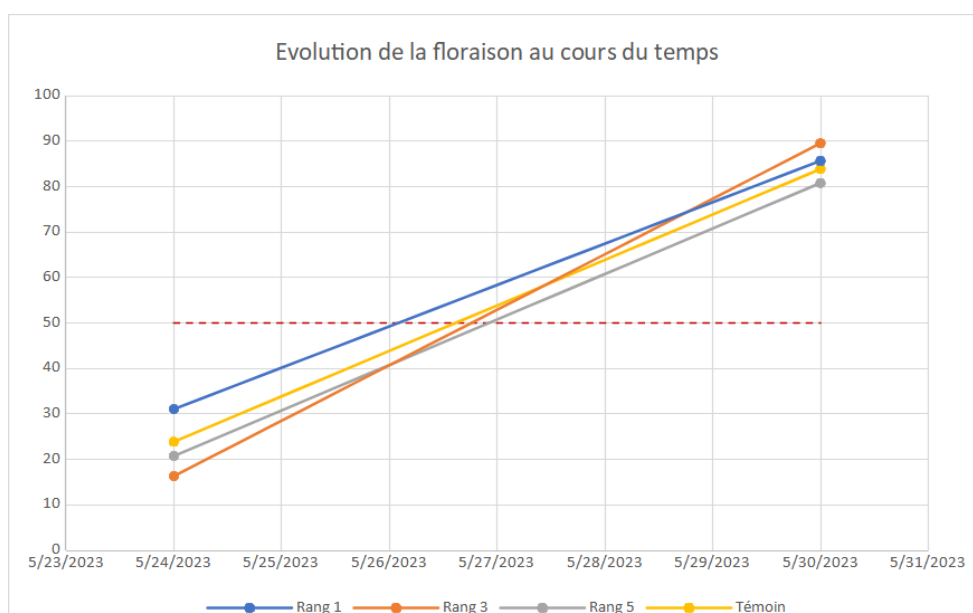


Figure 17: Evolution de la floraison au cours du temps

3 – 3. Effet sur les stades phénologiques

Le débourrement

Le tableau 2 montre le pourcentage de bourgeons aux stades BBCH 00 (bourgeon en dormance), BBCH 05 (bourgeon dans le coton), BBCH 09 (pointe verte), BBCH 10 (éclatement du bourgeon) et BBCH 12-13 (stade 2 – 3 feuilles).

Pour le stade BBCH 00, BBCH 09 et BBCH 12-13, c'est le rang 1 qui a le pourcentage le plus fort (19%), même s'il n'y a pas de différence significative entre les rangs. Pour le stade BBCH 05, c'est le rang 3 qui a le pourcentage le plus fort (56%), mais il n'y a pas de différence significative entre les rangs. Enfin, c'est pour le stade BBCH 10 qu'il y a une différence significative entre les rangs 1 et 3.

Les tests statistiques montrent qu'il y a une différence significative entre les rangs 1 et 3 au stade BBCH 10 ($p\text{-value} < 0,05$). Sinon, il n'y a aucune différence significative entre les rangs, quel que soit le stade considéré ($p\text{-value} > 0,05$).

La floraison

La floraison sur la parcelle a commencé à partir du 17/05/2023, date à laquelle les premières fleurs étaient visibles sur le premier rang (celui contre la haie). La notation a été réalisée le 24/05/2023.

Le tableau 3 présente le pourcentage de grappes aux différents stades de floraison (BBCH 57, BBCH 60, BBCH 61, BBCH 62, BBCH 63, BBCH 64, BBCH 65, BBCH 66, BBCH 67, BBCH 68 et BBCH 69).

Pour le stade BBCH 57, le rang 1 est celui qui a un pourcentage plus faible (47,1%) et le rang 5 a le pourcentage plus élevé (63,3%). Cependant, il n'y a aucune différence significative entre les rangs. Pour le stade BBCH 69, c'est le rang 1 qui a le pourcentage élevé (20,8%) et le rang 3 qui a le plus petit (5,7%). Il n'y a cependant pas de différence significative entre les rangs. Pour les autres stades, il n'y a pas de différence significative, sauf pour le stade BBCH 63, où le rang 5 et le rang témoin ont un pourcentage significativement plus élevé que le rang 1.

La notation de floraison a été réalisée deux fois, mais la seconde notation ne fera pas l'objet d'une analyse. Grâce aux deux notations, le jour de mi-floraison a été déterminé (Figure 17)

La figure 17 montre que le rang 1 est en avance sur la floraison comparé aux autres rangs, et cela s'est vérifié sur le terrain, puisque c'est sur le premier rang que les premières fleurs ont été observées. La date de mi-floraison du rang 1 semble avoir précédé celle des autres rangs, mais ce n'est pas significatif, puisque la mi-floraison apparaît entre le 26-27 mai 2023.

Tableau 4: Pourcentage de baies à véraison

Rang	Pourcentage de baies à véraison
Rang 1	57,5 % (a)
Rang 3	53,7 % (a)
Rang 5	46,5 % (a)
Témoin	52,7 % (a)

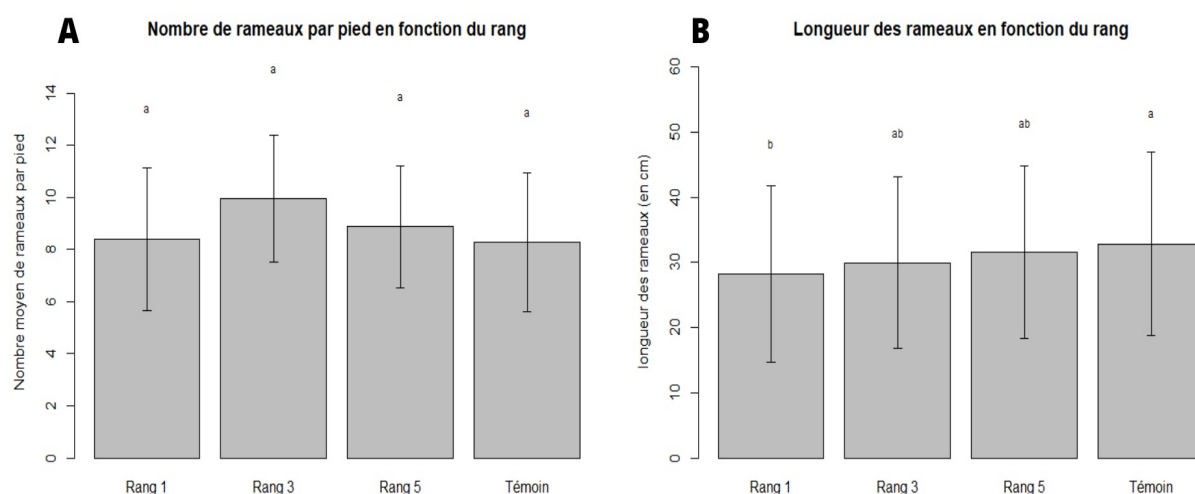


Figure 18: Nombre de rameaux (A) et longueur des rameaux (B) en fonction du rang

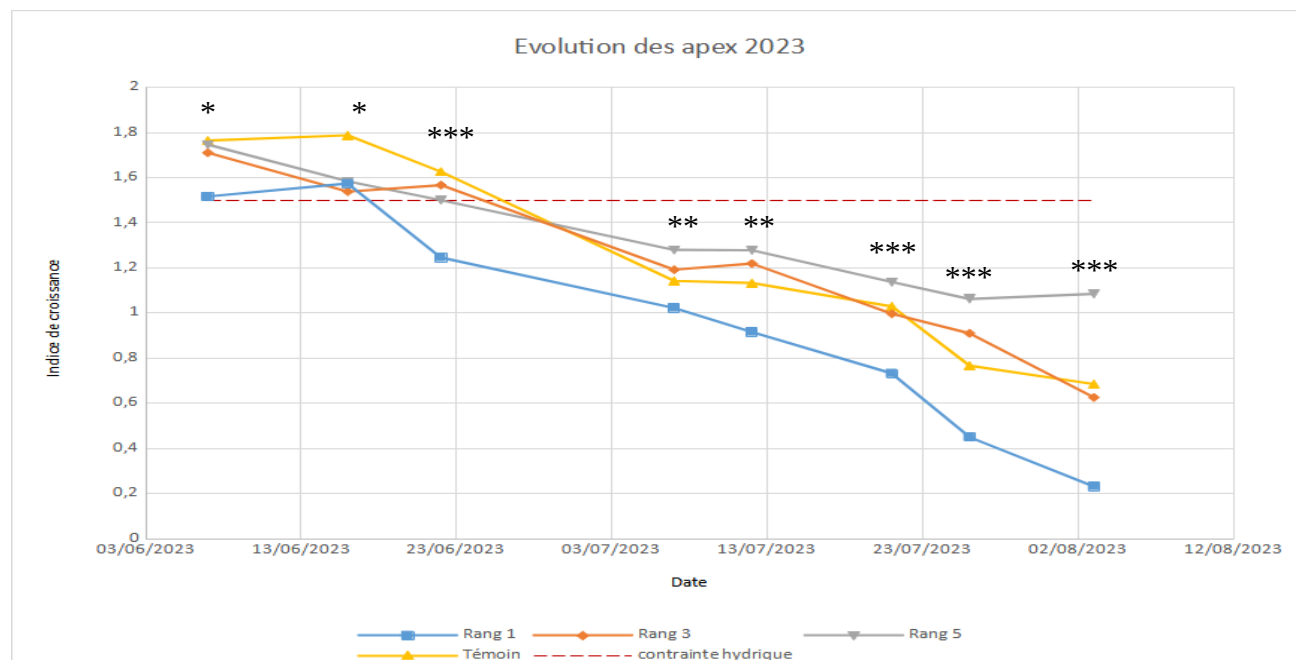


Figure 19: Evolution des apex en fonction du rang. * : p -value<0,05 ; ** : p -value<0,01 ; * : p -value<0,001**

La véraison

Les premières baies vérées ont été observées à partir du 12/07/2023. La notation a été faite le 25/07/2023.

Le tableau 4 montre le pourcentage de véraison de chaque rang. Le premier rang a 57,50 % de ses baies qui sont à véraison, le rang 3 est à 53,67 %, le rang 5 à 46,53 % et le rang témoin est à 52,67 % (Figure 17). Il n'y a aucune différence significative entre les rangs ($p\text{-value}>0,05$).

3 – 4. Effet sur la croissance

Les rameaux

La figure 18.A montre le nombre moyen de rameaux par pied en fonction de la distance à la haie. Au premier rang, le nombre moyen de rameaux est de 8,4 rameaux par cep, pour le troisième rang il y a 9,9 rameaux par cep, pour le cinquième rang, il y a 8,9 rameaux par rang et enfin pour le rang témoin, il y a 8,3 rameaux par ceps. Aucune différence significative n'est observée entre les rangs ($p\text{-value}>0,05$).

La figure 18.B montre la longueur moyenne des rameaux en fonction de la distance à la haie. Pour le premier rang, la longueur moyenne est de 28,3 cm, pour le troisième rang la longueur moyenne est de 30,0 cm, pour le cinquième rang la longueur moyenne est de 31,6 cm et enfin pour le rang témoin, la longueur moyenne est de 32,9 cm. D'un point de vue statistique, il y a une différence significative entre le rang 1 et le rang témoin ($p\text{-value}<0,05$).

Les apex

Les résultats du suivi des apex sont présentés en figure 19. Au fur et à mesure que l'été avance, les indices de croissances diminuent. On peut voir que le rang 1 a un indice de croissance significativement plus faible que les autres, sauf le 16 juin, où c'est le rang témoin qui a un indice significativement plus grand que les autres. Le premier rang atteint la contrainte hydrique modérée avant les autres rangs, vers le 19-20 juin, alors que les autres l'atteignent vers le 24 juin. À partir du 3 août, on remarque des différences significatives entre les rangs ($p\text{-value}<0,05$). Le rang 5 a un indice supérieur aux rangs 3 et témoin qui ont significativement les mêmes indices de croissance, qui sont eux-mêmes supérieurs à l'indice de croissance du rang 1 (Figure 19).

Masse surfacique

Le pourcentage de masse sèche sur les feuilles primaires des différents rangs de l'essai a été calculé (données non montrées). Pour le rang 1, le pourcentage de masse sèche est de 39,73 %, pour le rang 3, le pourcentage de masse sèche est de 36,73 %, pour le rang 5 c'est 41,02 % et pour le témoin, le pourcentage de masse sèche est de 33,33 %. Il n'y a aucune différence significative entre les rangs ($p\text{-value}>0,05$).

Tableau 5: Températures et humidités relatives moyennes du rang 1 et témoin au cours des mois de mai, juin et juillet

Mois	Heure	Rang	Température (en °C)	ΔTempérature	Humidité (en %)	ΔHumidité
Mai	0h	Rang 1	15,86	-0,51	72,65	-3,17
		Témoin	16,37		75,82	
	6h	Rang 1	13,34	-1,57	77,62	-5,14
		Témoin	14,91		82,76	
	14h	Rang 1	26,66	-2,37	48,38	+0,50
		Témoin	29,03		47,89	
	18h	Rang 1	23,30	-1,00	53,97	-1,12
		Témoin	24,30		55,09	
Juin	0h	Rang 1	21,43	+0,28	61,25	-5,33
		Témoin	21,15		66,58	
	6h	Rang 1	20,51	-1,24	60,74	-5,79
		Témoin	21,74		66,53	
	14h	Rang 1	30,78	-0,64	42,79	+0,76
		Témoin	31,42		42,03	
	18h	Rang 1	28,26	+0,14	47,07	-1,47
		Témoin	28,12		48,54	
Juillet	0h	Rang 1	27,44	+1,30	52,22	-1,97
		Témoin	26,15		54,13	
	6h	Rang 1	23,77	-4,98	56,04	+9,93
		Témoin	28,66		46,10	
	14h	Rang 1	32,45	+2,97	42,65	-1,38
		Témoin	29,48		44,03	
	18h	Rang 1	32,62	+3,82	41,49	+2,12
		Témoin	28,79		39,36	

3 – 5. Effet sur le micro-climat

Température

Le tableau 5 présente les températures moyennes et les humidités relatives moyennes au niveau du rang 1 (contre la haie) et du rang témoin, au cours des mois de mai, juin et juillet. Les graphiques de leur évolution au cours d'une journée sont présentés en annexe (Annexe 5). Les variations de températures sont cycliques : il y a une baisse de température entre 14h00 et 6h00, puis une augmentation entre 6h00 et 14h00 (Annexe 5).

Au cours du mois de mai, les températures moyennes du rang 1 sont plus faibles que le rang témoin (Tableau 5), avec une différence maximale de 2,37°C entre les deux rangs à 14h. Au mois de juin, le rang 1 a des températures plus élevées à 0h et 18h, mais la différence est inférieure à 1°C (respectivement +0,28°C et +0,14°C), donc elle est négligeable. Le reste de la journée, les températures sont plus faibles au rang 1. Au mois de juillet, le rang 1 a des températures plus élevées que le rang témoin (Tableau 5). À 0h, la différence de température est de +1,30°C, à 14h la différence est de +2,97°C et à 18h la différence est de 3,82°C. Il n'y a qu'à 6h où la température est plus faible au rang 1 qu'au rang témoin.

Humidité

Le tableau 5 présente les températures moyennes et les humidités relatives moyennes au niveau du rang 1 (contre la haie) et du rang témoin, au cours des mois de mai, juin et juillet. Les graphiques de leur évolution au cours d'une journée sont présentés en annexe (Annexe 6). Les variations de l'humidité sont cycliques : une augmentation de l'humidité entre 14h00 et 6h00, et une diminution de l'humidité entre 6h00 et 14h00 (Annexe 6).

Au cours du mois de mai, le rang 1 a une humidité relative plus basse que le rang témoin et c'est à 6h qu'il y a la plus grande différence entre les rangs (-5,1 % entre le rang témoin et le rang 1). À 14h, le rang 1 a une humidité relative légèrement plus élevée que le témoin (+0,5%). Le mois de juin a le même profil que le mois de mai : le rang 1 a une humidité relative plus faible que le témoin, sauf à 14h (Tableau 5). Au mois de juillet, l'humidité relative est plus élevée au rang 1 qu'au rang témoin (+9,93%), mais le reste de la journée les différences ne sont plus si grandes (Tableau 5).

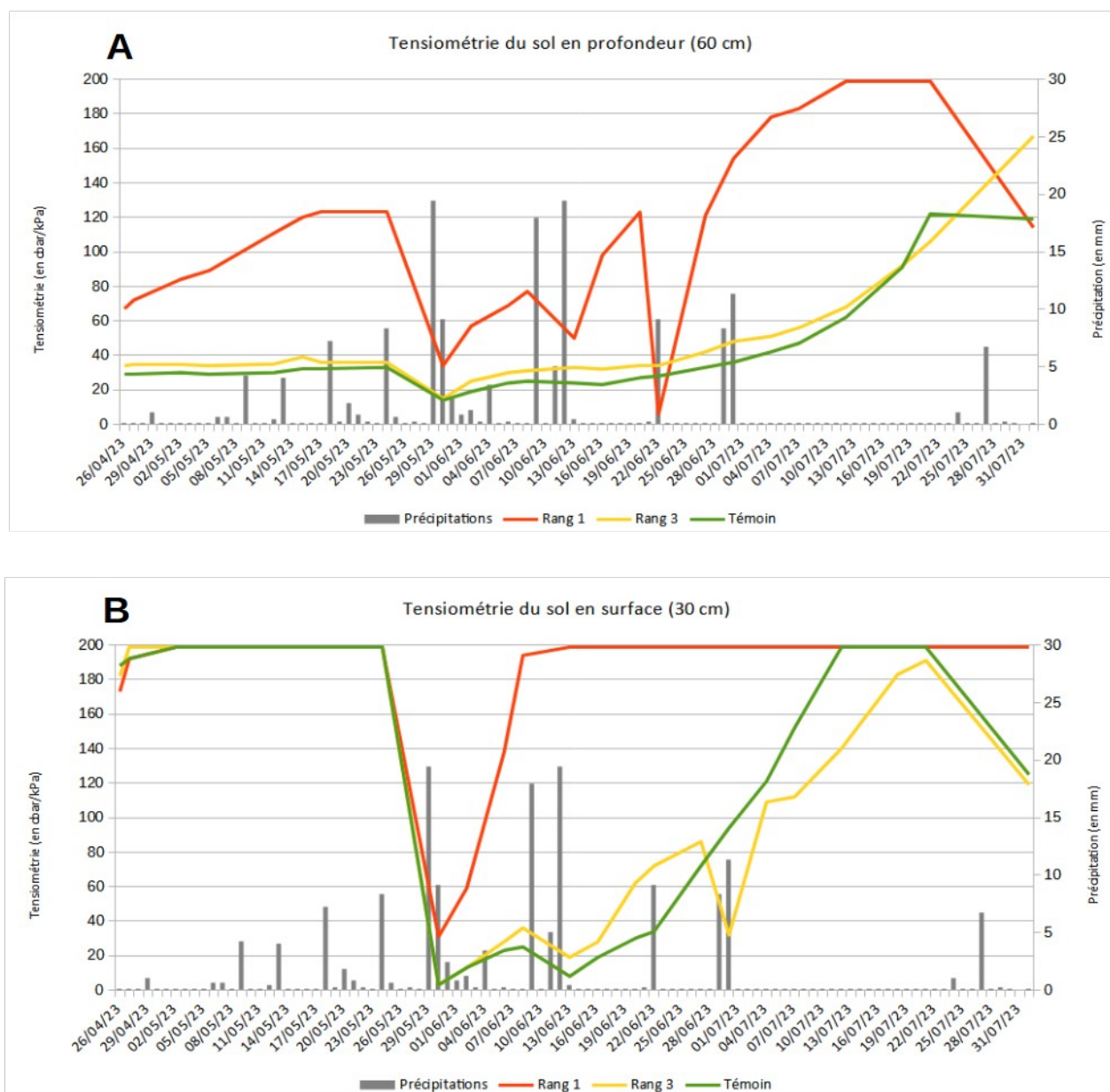


Figure 20: Evolution de la tensiométrie du sol en fonction des précipitations

Tableau 6: Indice de chlorophylle en fonction du rang

Rang	Indice de chlorophylle	Significativité
Rang 1	$34,4 \pm 2,4$	a
Rang 3	$36,0 \pm 1,3$	a
Rang 5	$35,7 \pm 0,3$	a
Témoin	$35,7 \pm 2,7$	a

Tensiométrie du sol

La figure 19 présente la valeur des tensiomètres en profondeur (Figure 20.A) et en surface (Figure 20.B). On remarque que les périodes de précipitations sont accompagnées d'une diminution de la valeur des tensiomètres, puis il y a une augmentation de leur valeur (Figure 20). On voit que le rang 1 a la valeur la plus haute comparée aux autres rangs (Figure 20). Le rang 1 est plus soumis aux variations que les autres rangs en profondeur (Figure 20.A). En surface, les valeurs de tensiomètres fluctuent plus qu'en profondeur (Figure 20.B) et ont des valeurs plus élevées. C'est aussi le rang 1 qui a les valeurs les plus élevées. En profondeur et en surface, le rang 3 et le rang témoin ont les mêmes profils.

3 – 6. Effet sur la teneur en chlorophylle

La teneur en chlorophylle des feuilles est présentée dans le tableau 6. Au premier rang, la teneur en chlorophylle est de 34,3, au rang 3 la teneur en chlorophylle est de 36,0, au rang 5 la teneur en chlorophylle est de 35,7 et au rang témoin, la teneur en chlorophylle est de 35,7 (Tableau 6). Aucune différence significative n'est observée entre les rangs, ni entre les blocs.

3 – 7. La biodiversité

Les enregistrements de chiroptères ont montré la présence de Grands Rhinolophes (*Rhinolophus ferrumequinum*), de Minioptères de Schreibers (*Miniopterus schreibersii*), d'oreillards gris (*Plecotus austriacus*), de Noctules de Leisler (*Nyctalus leisleri*), de Vespères de Savi (*Hypsugo savii*), de Sérotines commune (*Eptesicus serotinus*) ainsi que de plusieurs espèces de murins (*Myotis emarginatus*, *Myotis nattereri*, *Myotis mystacinus*) et de pipistrelles (*Pipistrellus pipistrellus*, *Pipistrellus kuhlii*, *Pipistrellus nathusii*, *Pipistrellus pygmaeus*).

Sur les deux nichoirs posés, un seul a été utilisé par les abeilles pour leur nid. Au total, jusqu'au mois d'août, 5 alvéoles sur les 32 disponibles ont été utilisées sur le nichoir du rang témoin (Annexe 7), alors qu'aucune alvéole n'a été utilisée pour le nichoir du rang témoin .

4. Discussion

4 – 1. Les aléas rencontrés et les pistes d'améliorations possibles

Au cours de cet essai, des aléas ont été rencontrés, ce qui n'a pas facilité certaines mesures. Tout d'abord, lorsque les ceps ont été choisis, le débourement n'avait pas encore lieu, et il était difficile de prévoir quels ceps étaient atteints de maladies du bois. Ceci a conduit plus tard à abandonner les mesures sur ces pieds. Il aurait été préférable de faire cet essai sur une parcelle où les maladies du bois ne sont pas présentes. Mais cela a permis de collecter des données et d'observer l'impact de la haie sur une parcelle dépérissante. Il aurait été intéressant d'avoir un même type de parcelle, mais sans haie, afin de comparer l'effet de la haie sur les maladies du bois. On pourrait s'attendre à ce que la haie ralentisse le dépérissement sur les premiers rangs. En effet, le programme Dép'Grenache a montré que des ceps moins vigoureux étaient moins sensibles aux maladies du bois.

D'autre part, l'utilisation de matériels qui dépendent de la technologie est aussi une source d'aléas. En effet, au cours de cet essai, une mauvaise programmation des sondes, et leur sensibilité au climat, ne leur ont pas permis d'enregistrer les données tout au long du stage. Certains résultats sont aberrants et rendent inexploitable les résultats. Malheureusement, il n'existe pas de moyens pour éviter ces problèmes, et il est important de s'assurer du bon fonctionnement des sondes régulièrement.

La taille de la haie est hétérogène et la sélection des ceps à étudier a été rendue difficile par la présence de maladies du bois de la vigne sur la parcelle. De ce fait, au rang 1, certains ceps n'étaient pas sous l'influence de la haie, puisqu'elle était plus petite que la hauteur de vigne. Aucun ombrage n'était visible. Il aurait été préférable de prendre aussi en considération la place des pieds par rapport à la haie, mais cela aurait compliqué la sélection des ceps.

4 – 2. L'effet de la haie sur le vignoble

La haie de cet essai, avait trois objectifs principaux lors de son élaboration :

1. Apporter de la biodiversité,
2. Améliorer l'esthétisme paysager,
3. Avoir un effet brise-vent.

Le projet VITAM s'intéresse à l'aspect agronomique qu'apporte cette haie, mais voyons si elle remplit aussi les fonctions qui ont décidé son implantation.

La haie, un réservoir à biodiversité

La haie de la parcelle d'essai est diversifiée et contient près de 16 essences différentes. Ce sont des essences autochtones, mellifères et qui ont des dates de floraisons différentes. Cela permet d'attirer les pollinisateurs aux alentours de la parcelles. La présence de nids dans les nichoirs à

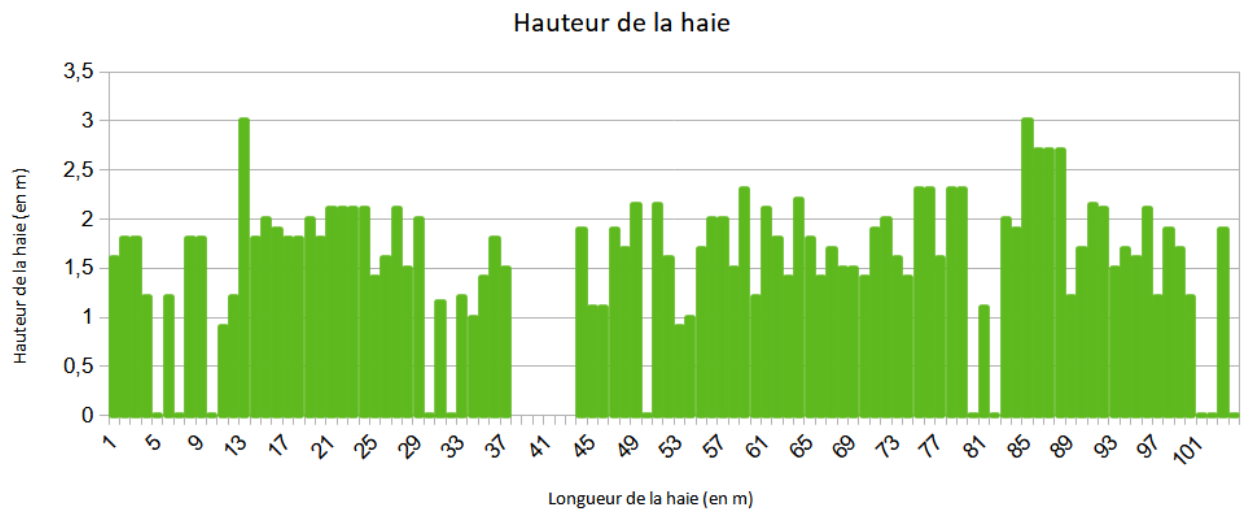


Figure 21: Profil de la hauteur de la haie basse diversifiée.

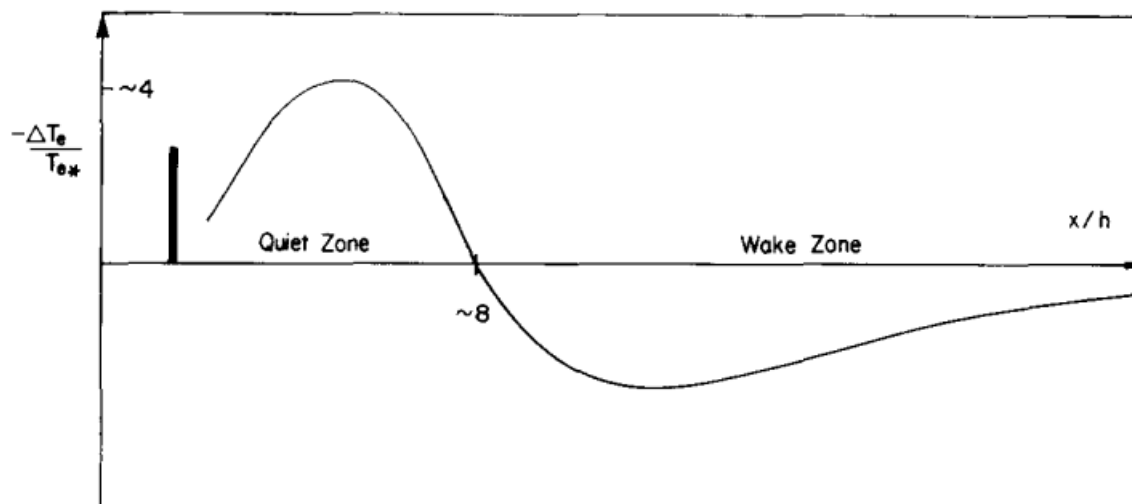


Figure 22: Evolution de la température en fonction de la distance d'une haie brise-vent (McNaughton 1988)

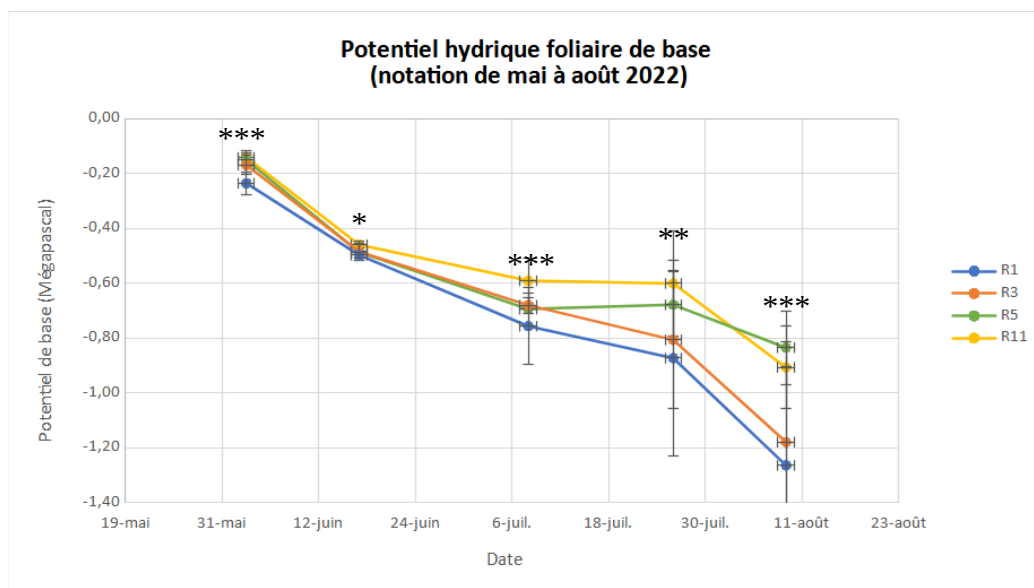


Figure 23: Evolution du potentiel hydrique foliaire de base en 2022. * : $p\text{-value} < 0,05$; ** : $p\text{-value} < 0,01$; *** : $p\text{-value} < 0,001$

abeilles solitaires marquent leur présence sur la parcelle, et donc l'attrait qu'a cette haie pour les pollinisateurs. La diversité des essences permet donc une diversité d'invertébrés à proximité de la haie. L'inventaire de la biodiversité de 2022 était plus complet que celui de 2023. Les résultats de 2022 montrent qu'au niveau de la haie, il y a une richesse et une abondance plus élevée qu'au sein de la parcelle. Les résultats ont aussi montré que la haie abritait des auxiliaires de cultures. Leur présence est nécessaire car elle permet d'exercer une pression sur les ravageurs présents dans le vignoble, et ainsi de minimiser l'utilisation de produits phytosanitaires contre ces ravageurs. La haie remplit donc sa fonction de réservoir à biodiversité.

La haie, une protection contre le vent

À la vue de l'allure de la haie (Figure 21), elle apparaît comme hétérogène et basse, en moyenne 1,6 m de haut. Son orientation nord-sud et sa place à l'ouest de parcelle ne lui permettent pas de protéger complètement les vignes contre les vents nord-nord-ouest. On ne peut donc pas s'attendre à ce que cette haie ait exactement les mêmes propriétés qu'une haie brise-vent, mais on peut essayer de voir s'il y a des similitudes et si oui, dans quelles mesures.

Les températures en journée du mois de juillet sont supérieures au rang 1 par rapport au rang témoin. Différentes études ont montré qu'en aval d'une haie-brise-vent, on pouvait distinguer deux zones : une zone silencieuse (*quiet zone*) et une zone éveillée (*wake zone*) (Figure 22) (McNaughton 1988). La zone silencieuse se caractérise par une température et une humidité plus élevée que la zone éveillée (McNaughton 1988). Si on pose h , la hauteur de la haie, la zone silencieuse est comprise entre $0,15h$ et $8h$, tandis que la zone éveillée est après les $8h$ (Figure 22). Dans le cadre de la haie du projet VITAM, la hauteur moyenne de la haie est de 1,6 m. Ce qui veut dire que la zone silencieuse est entre 0,2 m et 12,8 m de la haie. Il aurait été intéressant de vérifier ces résultats, en ayant des sondes au rang 3 (6 m), au rang 5 (10 m) et aux rangs proches du témoin. Faute de matériel, il n'a pas été possible de réaliser ces mesures. Sur les autres sites pilotes du projet, il a été remarqué en 2022 que la température du rang proche de la haie est légèrement plus élevée (entre $+0,5^{\circ}\text{C}$ et $+1,6^{\circ}\text{C}$) à 14h00, quand le soleil est au zénith.

La haie, un compétiteur pour l'eau

Les mesures de la tensiométrie du sol montrent une compétition hydrique. Les tensiomètres mesurent la disponibilité de l'eau dans le sol. Les valeurs sont comprises entre 0 centibar/kPa et 199 centibar/kPa. Plus la valeur est grande, plus la vigne dépense de l'énergie pour absorber l'eau du sol. Après des périodes pluvieuses, le rang 1 et le rang 3 ont des valeurs qui augmentent plus rapidement que le rang témoin. Ce qui signifie qu'au rang 1, l'eau est moins disponible plus rapidement pour les ceps. Les pieds du premier rang ont un indice de croissance qui est toujours inférieur aux autres rangs. Cela signifie que leurs ressources en eau sont plus faibles que pour les autres, ce qui est vérifié par les valeurs des tensiomètres. Cette année, il n'a pas été possible de faire des mesures de chambres à pression, mais les résultats de l'an dernier montrent que le premier rang a un stress hydrique plus élevé que les autres rangs (Figure 23).

Cependant, en fortes contraintes hydriques, le rang 3 est aussi en contrainte. Le rang 5 est dans le même état hydrique que le rang témoin. Dans un système agroforestier de haie basse sur une parcelle séchante, la compétition hydrique générée par la haie n'est plus visible à partir de 10 mètres de la haie. L'eau étant une ressource importante pour le développement de la vigne, la compétition hydrique altère la croissance des rameaux de la vigne. L'indice de croissance initialement plus faible au rang 1 pourrait expliquer la plus faible longueur des rameaux de ce rang. Il est possible que comme l'année 2022 a été plus chaude et avec plus de contraintes hydriques, tous les ceps aient eu des difficultés à croître, ce qui pourrait expliquer pourquoi il n'y a pas de différence significative sur la longueur des rameaux.

4 – 3. Comparaison des années 2022 et 2023

En 2022, le climat a été chaud (+1,1°C par rapport à 2023) avec peu de précipitations (cumul de 2022 de avril à août à Orange : 93,5 mm). En 2023, le climat a été un peu moins chaud avec plusieurs précipitations en mai et en juin (cumul de 2023 de avril à août à Orange : 157,4 mm). Le climat chaud et sec de 2022 explique qu'il n'y ait eu aucune observation de maladies telles que mildiou et oïdium sur la parcelle, alors que le mildiou a été observé en 2023.

Aucune différence dans la phénologie des rangs n'a été remarquée cette année et l'an dernier. Aucun effet sur la longueur des rameaux n'a été observé en 2022. Les mesures des apex ont montré qu'on pouvait diviser les rangs en deux catégories : les rangs avec des indices de croissances élevés (rang 5 et rang témoin), et les rangs avec les indices de croissances plus faibles (rang 1 et 3). À cause des précipitations qu'il y a eu en 2023, les apex ont un indice de croissance supérieur cette année par rapport à l'an dernier. Par exemple, au début des premières mesures des apex de 2022, l'indice de croissance du premier rang est 0,08 (28 juin 2022), alors que cette valeur n'est même pas atteinte lors de la dernière mesure de 2023, dont l'indice de croissance est de 0,23 (3 août 2023). La différence de climat entre les deux années est intéressante car elle montre le comportement de la vigne dans un contexte agroforestier lors deux conditions climatiques différentes.

Ces deux années permettent de mettre en évidence que la haie basse diversifiée :

- N'abaisse pas la température du rang à proximité ;
- N'a pas d'effet significatif sur la précocité de la phénologie ;
- A un effet compétiteur pour les ressources en eau, jusqu'à au moins 10 m (6,25h).

Pour le moment, comme les vendanges n'ont pas été réalisées pour 2023, on ne peut pas donner de conclusion sur l'effet de la haie sur le rendement.

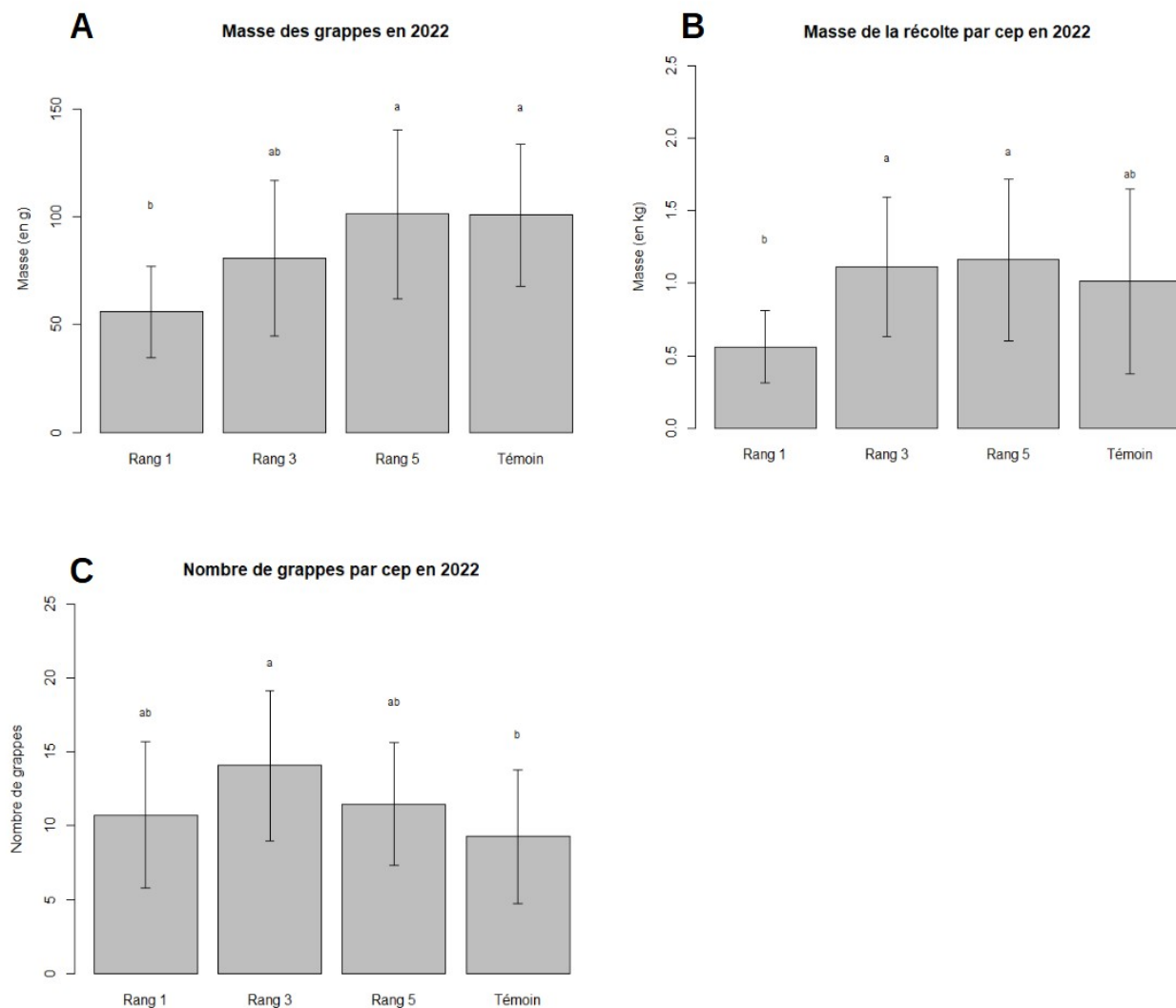


Figure 24: Paramètres de rendement des vendanges 2022

Tableau 7: Résultats des contrôles maturités de 2022

Rang	Degré potentiel alcoolique (en %)	Acidité totale (en g/L eq. H ₂ SO ₄)	pH	Acide tartrique (en g/L)	N assimilable (mg/L)	δ ¹³ C
Rang 1	13,4 (a)	2,4 (a)	3,6 (a)	7,3 (a)	186,7 (a)	-22,19 (a)
Rang 3	13,0 (a)	3,2 (a)	3,4 (a)	8,1 (a)	150,0 (a)	-22,94 (a)
Témoins	13,9 (a)	2,5 (a)	3,5 (a)	6,4 (a)	198,3 (a)	-22,96 (a)

4 – 4. Ce qu'on peut attendre pour les vendanges de 2023

Les résultats de vendanges 2023 ne seront pas présentés dans ce mémoire, car elles n'auront pas été réalisées avant la fin de sa rédaction. Cependant, les résultats de l'an dernier pourront nous aider à prévoir ceux de cette année.

Le nombre de grappes par cep n'était pas différent entre les rangs en 2022. Seule la masse des grappes était significativement différente (Figure 24). Les grappes du rang 1 ont une masse statistiquement inférieure aux rang 5 et rang témoin. Les grappes du rang 3 sont plus légères que celles des rangs 5 et témoin mais ce n'est pas statistiquement différent. Cela veut dire qu'il y a un effet gradient de la haie sur le rendement, et qu'à partir de 10 m au moins (le rang 5), il n'y a plus d'effet de la haie sur le rendement, dans le cadre de notre essai. On peut supposer que cette année, la masse des grappes suivra la même tendance que 2022, et qu'il n'y aura plus de différence significative à partir du rang 5. Comme les conditions climatiques sont différentes entre les deux années on peut s'attendre à des différences de masse des grappes. Il y a une différence significative sur le nombre de grappes par cep entre le rang 3 et le rang témoin ($p\text{-value}<0,05$), mais pas entre les autres rangs (Figure 24.C). Il y a une différence significative sur la masse de récolte par cep entre le rang 1 et 3 ($p\text{-value}<0,05$), mais pas entre les autres rangs (Figure 24.B). Ces résultats suggèrent que la baisse de rendement est principalement liée à la masse des grappes plutôt qu'au nombre de grappes par cep.

Les degrés des potentiels alcooliques des contrôles de maturité de 2022 sont présentés dans le tableau 7. Le potentiel de degré alcoolique du rang 1 est de 13,43°, celui du rang 3 est de 12,95° et le degré de potentiel alcoolique du rang témoin est de 13,92°. Il n'y a aucune différence significative entre les rangs ($p\text{-value}>0,05$). Ces résultats montrent que le degré de potentiel alcoolique n'est pas diminué par la présence de la haie. Cette dernière, même si elle est basse apporte un peu d'ombrage, et on aurait pu s'attendre à ce qu'il y ait des différences sur les contrôles de maturité entre le rang 1 et le rang témoin, notamment sur le degré alcoolique. Mais comme on l'a vu précédemment, la présence de la zone silencieuse ne diminue pas la température lors de la période de véraison et de maturation, ce qui ne modifie pas la composition en acides et en sucres.

Les autres résultats de contrôle de maturité montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les rangs pour le pH, l'azote assimilable et la concentration en acide tartrique (Tableau 7). Les résultats de 2023 serviront à confirmer ou infirmer les observations de 2022. Peut-être que cette année, on pourra voir une différence (significative ou non) entre les rangs concernant les contrôles de maturité, étant donné que le contexte climatique est différent.

4 – 5. Les résultats du projet VITAM et leurs mises en perspective

Le but du projet VITAM est de collecter des données sur l'effet de l'agroforesterie sur le vignoble dans un contexte de climat méditerranéen. Les résultats obtenus ne sont pas forcément ceux prévus par la littérature, mais ils permettent de mettre en évidence les limites des systèmes agroforestiers. Par exemple, si la mise en place d'une haie apparaît comme un point négatif car elle engendrerait une perte de rendement. Grâce aux données collectées, on peut estimer à combien

s'élèverait cette perte de rendement et donc une perte économique. En conditions idéales on a :

$$\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ 145 pieds par rangs} \\ \bullet \text{ 20 rangs} \\ \bullet \text{ Surface : 0,9 ha} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{densité} = \frac{\text{nombre de pieds par rangs} \times \text{nombre de rangs}}{\text{surface}} \\ \text{densité} = \frac{145 \times 20}{0,9} \\ \text{densité} = 3\,222 \text{ pieds/ha} \end{array}$$

On peut déterminer quel est le rendement maximal de cette parcelle en utilisant le poids de récolte par cep (1,09 kg/pied) :

$$\text{rendement}_{\max} = \text{poids de récolte par pied} \times \text{densité} = 1,09 \times 3222 = 3512 \text{ kg/ha}$$

Le rang 1 ne représente que 5 % de la parcelle totale. En moyenne, ce rang a produit 0,56 kg de raisin par cep, ce qui veut dire que la parcelle a produit :

$$\text{rendement} = 5\% \times \text{densité} \times \text{poids de récolte rang 1} + 95\% \times \text{densité} \times \text{poids récolte des autres rangs}$$

$$\text{rendement} = 0,05 \times 3222 \times 0,56 + 0,95 \times 3222 \times 1,09$$

$$\text{rendement} = 3427 \text{ kg/ha}$$

Le rendement de la parcelle est d'environ 3400 kg.ha⁻¹ au lieu de 3500 kg.ha⁻¹. Cela représente une baisse de 3 % sur la parcelle, ce qui est négligeable.

La plantation et l'entretien d'une haie représentent un coût économique à prendre en considération. Dans le cadre d'une haie diversifiée, à savoir qu'elle n'a pas d'objectif de production, le coût d'installation est estimé entre 700 € et 1500 € par an pendant cinq ans pour 1000 m de haie (Lhelgoualch and Sibé 2015). Cela comprend le prix d'installation et le prix de la main d'œuvre. Quand la haie est implantée, le prix annuel d'entretien est inférieur à 500 € pour 1000 m de haie (Lhelgoualch and Sibé 2015). L'entretien de la haie consiste en un arrosage pendant toute la première année d'implantation, le désherbage pendant les cinq premières années, puis une taille annuelle, en hiver ou au printemps (Lhelgoualch and Sibé 2015) afin de conserver la hauteur de haie désirée.

La légère baisse de rendement et les coûts d'entretien peuvent apparaître comme un frein économique pour les viticulteurs. Cependant il existe des aides financières et des accompagnements techniques. C'est le cas du programme « Plantons des haies ! », lancé en 2015 afin de planter 7000 km de haies intraparcellaires ('Un plan national de développement pour l'agroforesterie' 2021). En effet, depuis 1970, 70 % des haies ont disparu du paysage agricole ('Un plan national de développement pour l'agroforesterie' 2021). Cette disparition est due à la politique de remembrement qui a eu lieu entre 1955 et 1975 ('Remembrement' 2022) qui consistait à regrouper les parcelles des exploitations pour faciliter la mécanisation agricole ('Remembrement' 2022). Les dérives de cette politique ont conduit à une destruction des bocages, en faisant disparaître les obstacles à la mécanisation, comme les haies ou les mares ('Remembrement' 2022). Aujourd'hui, l'importance des bocages et des aménagements agroforestiers est bien connue et de nombreuses opérations de réembocagement ont lieu en France ('Remembrement' 2022). Pour inciter les agriculteurs à mettre en place des aménagements agroforestiers, il existe des aides. Par exemple, depuis 2007, la politique agricole commune (PAC) propose des aides spécifiques sur le

maintien des particularités topographiques comme le décrit les Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales n°7 (BCAE 7). Le non-respect de ce principe réduit les aides de la PAC liées à la surface ou au nombre de tête de bétail ('Un plan national de développement pour l'agroforesterie' 2021). Le BCAE 7 accepte une largeur maximale des haies de 10 m et une densité d'arbres maximale de 100 arbres par hectares ('Un plan national de développement pour l'agroforesterie' 2021). D'autres programmes proposent d'ajouter un aspect sociétal à ces replantations. Par exemple l'association « Des enfants et des arbres » proposent la plantation de haies par des agriculteurs et des enfants dans le cadre du programme scolaire. Cela permet de sensibiliser les enfants à la préservation de la biodiversité et des paysages, tout en tissant un lien social entre la nouvelle génération et des plus anciennes.

5. Conclusion

L'objectif du projet VITAM est de collecter des données agronomiques sur l'effet de l'agroforesterie sur un vignoble dans un contexte de climat méditerranéen. L'agroforesterie est un domaine de plus en plus étudié, même s'il manque encore de la littérature sur le sujet. En effet, lors de la rédaction de ce mémoire, tous les sujets qui traitaient des haies en agroforesterie, ne parlaient que des haies brise-vents. Or, dans notre cas, la haie n'est pas brise-vent : elle n'est pas bien positionnée et n'est pas assez grande (< 2 m). Cela rend l'interprétation des résultats assez délicate quand on s'appuie sur la littérature scientifique, d'où l'importance de ce genre de projet, afin de récolter des données sur tous types d'aménagements paysagers.

Les résultats montrent que l'agroforesterie n'a pas un effet significatif sur l'apparition des stades phénologiques, qu'il a un effet concurrentiel ce qui réduit la taille des rameaux à proximité de la haie et diminue la masse des grappes mais pas le nombre grappes par cep. La haie modifie le microclimat à proximité, mais il serait intéressant de refaire des mesures sur plusieurs années, afin de voir si une tendance se dessine et de mieux caractériser le microclimat. Les résultats de 2022 des autres sites pilotes du VITAM suggèrent les mêmes observations que celle d'Orange. Ce qui montre que malgré différents climats, différents environnements et différents aménagements paysagers, les systèmes agroforestiers ont les mêmes effets sur la vigne sur certains facteurs.

Pour lutter contre les effets du changement climatique, il n'existe pas une seule solution, des alternatives, qui, combinées entre elles, permettent une activité plus durable. Les aspects sociaux, économiques et environnementaux doivent être considérés lors de la mise en place de ces pratiques, afin de les pérenniser. L'agroforesterie peut répondre à ces enjeux, car elle prend en compte l'aspect environnemental, en apportant de la biodiversité et en diversifiant les cultures. L'aspect économique est pris en compte, car selon l'aménagement agroforestier mis en place, il est possible d'en retirer un revenu. En effet selon les variétés d'arbres, on peut vendre la production associée (arboriculture, bois de chauffe ou de construction). Enfin, l'aspect social est aussi mis en avant, par la main d'œuvre qu'elle nécessite pour son entretien et donc la génération de nouveaux emplois. De plus, les programmes de réembocagement sont des programmes sociaux où l'entre-aide et le partage sont de mises pour la plantation de haies par exemple.

La collecte de données sur l'effet d'aménagements agroforestiers sur le vignoble doit se poursuivre dans le temps. En effet, il est important de diversifier les conditions expérimentales, afin d'évaluer les différents comportements du vignoble. À terme, ces données permettront de conseiller et d'accompagner les viticulteurs lors de la mise en place de systèmes agroforestiers et d'adapter celui-ci aux exigences des viticulteurs

Bibliographie

- Aguilera E, Díaz-Gaona C, García-Laureano R, Reyes-Palomo C, Guzmán GI, Ortolani L, Sánchez-Rodríguez M, Rodríguez-Estévez V (2020) Agroecology for adaptation to climate change and resource depletion in the Mediterranean region. A review. *Agricultural Systems* **181**, 102809. doi:10.1016/j.agry.2020.102809.
- Altieri MA, Nicholls CI, Henao A, Lana MA (2015) Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* **35**, 869–890. doi:10.1007/s13593-015-0285-2.
- Antoniadou T, Besse P, Fougères AL, Stephenson DB (2001) L'oscillation atlantique nord (NAO) et son influence sur le climat européen.
- Ashenfelter O, Storchmann K (2014) Wine and Climate Change. *American Association of Wine Economists Working Paper* **152**, 43 p.
- Bastide I, Vinet M, Vinet B, Wyss D (2022) Agroforesterie en viticulture, une étape vers la résilience. *DELINAT Consult. Domaine Emile Grelier* 1–11.
- Boss PK, Davies C, Robinson SP (1996) Expression of anthocyanin biosynthesis pathway genes in red and white grapes. *Plant Molecular Biology* **32**, 565–569. doi:10.1007/BF00019111.
- Bourgade, Alonso Ugaglia, Dufourcq T, Grimaldi J, Guenser, Montagne, Ranjard (2020) VITIFOREST : Evaluation de l'impact de l'arbre agroforestier en contexte viticole. *Innovations Agronomiques* **79**, 471–497.
- Cassou C (2004) l'oscillation nord-atlantique. *La Météorologie*.
- Chambre d'Agriculture PACA (2020) Viticulture. <https://paca.chambres-agriculture.fr/notre-agriculture/viticulture/>.
- Chaves MM, Santos TP, Souza CR, Ortuño MF, Rodrigues ML, Lopes CM, Maroco JP, Pereira JS (2007) Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality. *Annals of Applied Biology* **150**, 237–252. doi:10.1111/j.1744-7348.2006.00123.x.
- Chaves MM, Zarrouk O, Francisco R, Costa JM, Santos T, Regalado AP, Rodrigues ML, Lopes CM (2010) Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of Botany* **105**, 661–676. doi:10.1093/aob/mcq030.
- Cifre J, Bota J, Escalona JM, Medrano H, Flexas J (2005) Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Agriculture, Ecosystems & Environment* **106**, 159–170. doi:10.1016/j.agee.2004.10.005.
- Donkó Á, Zanathy G, Éros-Honti Z, Villangó S, Bisztray GD (2014) Changes of mycorrhizal colonization along moist gradient in a vineyard of Eger (Hungary). *Acta Universitatis Sapientiae, Agriculture and Environment* **6**, 13–23. doi:10.2478/ausae-2014-0008.
- Duchene E (2016) How can grapevine genetics contribute to the adaptation to climate change? *OENO One* **50**,. doi:10.20870/oeno-one.2016.50.3.98.

- Duchêne E, Huard F, Dumas V, Schneider C, Merdinoglu D (2010) The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate Research* **41**, 193–204. doi:10.3354/cr00850.
- Ferrara G, Magarelli A, Palasciano M, Coletta A, Crupi P, Tarantino A, Mazzeo A (2022) Effects of different winter pruning times on table grape vines performance and starch reserves to face climate changes. *Scientia Horticulturae* **305**, 111385. doi:10.1016/j.scienta.2022.111385.
- FEVS (2022) Chiffres clés du marché des vins et spiritueux en France. *FEVS*. <https://www.fevs.com/la-filiere/chiffres-cles/>.
- Fulchin E (2018) L'agroécologie en viticulture : où en sommes-nous ? *Union Girondine Des Vins de Bordeaux* 47–50.
- García de Jalón S, Burgess PJ, Graves A, Moreno G, McAdam J, Pottier E, Novak S, Bondesan V, Mosquera-Losada R, Crous-Durán J, Palma JHN, Paulo JA, Oliveira TS, Cirou E, Hannachi Y, Pantera A, Wartelle R, Kay S, Malignier N, Van Lerberghe P, Tsonkova P, Mirck J, Rois M, Kongsted AG, Thenail C, Luske B, Berg S, Gosme M, Vityi A (2018) How is agroforestry perceived in Europe? An assessment of positive and negative aspects by stakeholders. *Agroforestry Systems* **92**, 829–848. doi:10.1007/s10457-017-0116-3.
- Giorgi F, Lionello P (2008) Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* **63**, 90–104. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005.
- Gliessman S (2018) Defining Agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems* **42**, 599–600. doi:10.1080/21683565.2018.1432329.
- Graves AR, Burgess PJ, Liagre F, Pisanelli A, Paris P, Moreno G, Bellido M, Mayus M, Postma M, Schindler B, Mantzanas K, Papanastasis VP, Dupraz C (2008) Farmer Perceptions of Silvoarable Systems in Seven European Countries. 'Agrofor. Eur.' (Eds A Rigueiro-Rodríguez, J McAdam, MR Mosquera-Losada) *Advances in Agroforestry*. pp. 67–86. (Springer Netherlands: Dordrecht) doi:10.1007/978-1-4020-8272-6_4.
- Guyot (1983) Les effets aérodynamiques et microclimatiques des brise-vent et des aménagements régionaux. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/Book%2077/meteorology%20and%20agroforestry/html/les_effets_microclimatiques.htm?n=64.
- Jaakola L (2013) New insights into the regulation of anthocyanin biosynthesis in fruits. *Trends in Plant Science* **18**, 477–483. doi:10.1016/j.tplants.2013.06.003.
- Jacq V, Albert P, Delorme R (2005) Le mistral, quelques aspects des connaissances actuelles. *La Météorologie* 30–38.
- Kobayashi S, Goto-Yamamoto N, Hirochika H (2005) Association of VvmybA1 gene expression with anthocyanin production in grape (*Vitis vinifera*) skin-color mutants. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* **74**, 196–205.
- van Leeuwen C, Darriet P (2016) The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *Journal of Wine Economics* **11**, 150–167. doi:10.1017/jwe.2015.21.

- Lereboullet A-L, Beltrando G, Bardsley DK, Rouvellac E (2014) The viticultural system and climate change: coping with long-term trends in temperature and rainfall in Roussillon, France. *Regional Environmental Change* **14**, 1951–1966. doi:10.1007/s10113-013-0446-2.
- Lhelgoualch E, Sibé V (2015) Vers l'agroécologie, paysage et biodiversité: Comment préserver ou aménager des Zone Ecologiques Réservoir dans le vignoble ? *AREDEVI* 19 p.
- Marguerit E, Brendel O, Lebon E, Van Leeuwen C, Ollat N (2012) Rootstock control of scion transpiration and its acclimation to water deficit are controlled by different genes. *New Phytologist* **194**, 416–429. doi:10.1111/j.1469-8137.2012.04059.x.
- McNaughton KG (1988) Effects of Windbreaks on Turbulent Transport and Microclimate. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **22/23**, 17–39.
- Mori K, Goto-Yamamoto N, Kitayama M, Hashizume K (2007) Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *Journal of Experimental Botany* **58**, 1935–1945. doi:10.1093/jxb/erm055.
- Naulleau A, Gary C, Prévot L, Hossard L (2021) Evaluating Strategies for Adaptation to Climate Change in Grapevine Production—A Systematic Review. *Frontiers in Plant Science* **11**, 607859. doi:10.3389/fpls.2020.607859.
- Neri D, Castagnoli M, Poni S, Corelli L (2003) Diversified response to drought of light exposed and shaded leaves of potted grapevine, peach and pear trees. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research* **11**, 5–15.
- Oliveira M, Barbosa P, Olazabal F (2011) GRAPEVINE SHADING: REDUCING YIELD LOSS AND CHANGING MUST COMPOSITION IN DOURO.
- Ozturk T, Ceber ZP, Türkeş M, Kurnaz ML (2015) Projections of climate change in the Mediterranean Basin by using downscaled global climate model outputs: PROJECTIONS OF CLIMATE CHANGE IN MEDITERRANEAN BY USING GLOBAL MODELS. *International Journal of Climatology* **35**, 4276–4292. doi:10.1002/joc.4285.
- Parker A, de Cortázar-Atauri IG, Chuine I, Barbeau G, Bois B, Boursiquot J-M, Cahurel J-Y, Claverie M, Dufourcq T, GénY L, Guimberteau G, Hofmann RW, Jacquet O, Lacombe T, Monamy C, Ojeda H, Panigai L, Payan J-C, Lovelle BR, Rouchaud E, Schneider C, Spring J-L, Storchi P, Tomasi D, Trambouze W, Trought M, van Leeuwen C (2013) Classification of varieties for their timing of flowering and veraison using a modelling approach: A case study for the grapevine species *Vitis vinifera* L. *Agricultural and Forest Meteorology* **180**, 249–264. doi:10.1016/j.agrformet.2013.06.005.
- Parker AK, De Cortázar-Atauri IG, Van Leeuwen C, Chuine I (2011) General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L.: Grapevine flowering and veraison model. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **17**, 206–216. doi:10.1111/j.1755-0238.2011.00140.x.
- Perin C, Verma PK, Harari G, Suued Y, Harel M, Ferman-Mintz D, Drori E, Netzer Y, Fait A (2023) Influence of late pruning practice on two red skin grapevine cultivars in a semi-desert climate. *Frontiers in Plant Science* **14**, 1114696. doi:10.3389/fpls.2023.1114696.
- Pichon L (2021) Development of a crowdsourcing approach adapted to agriculture specificities: the case of monitoring vine water status with the shoot growth approach. doi:10.13140/RG.2.2.28429.46560.

- Poni S, Sabbatini P, Palliotti A (2022) Facing Spring Frost Damage in Grapevine: Recent Developments and the Role of Delayed Winter Pruning – A Review. *American Journal of Enology and Viticulture* **73**, 211–226. doi:10.5344/ajev.2022.22011.
- Pouget R (1966) Relations entre la dormance et le rythme végétatif chez la vigne. *Bulletin de la Société Botanique de France* **113**, 101–109. doi:10.1080/00378941.1966.10838458.
- del Pozo A, Brunel-Saldias N, Engler A, Ortega-Farias S, Acevedo-Opazo C, Lobos GA, Jara-Rojas R, Molina-Montenegro MA (2019) Climate Change Impacts and Adaptation Strategies of Agriculture in Mediterranean-Climate Regions (MCRs). *Sustainability* **11**, 2769. doi:10.3390/su11102769.
- Pumariño L, Sileshi GW, Gripenberg S, Kaartinen R, Barrios E, Muchane MN, Midega C, Jonsson M (2015) Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology* **16**, 573–582. doi:10.1016/j.baae.2015.08.006.
- Remembrement (2022) *Géoconfluences*. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/remembrement>.
- Rienth M, Torregrosa L, Luchaire N, Chatbanyong R, Lecourieux D, Kelly MT, Romieu C (2014) Day and night heat stress trigger different transcriptomic responses in green and ripening grapevine (*Vitis vinifera*) fruit. *BMC Plant Biology* **14**, 108. doi:10.1186/1471-2229-14-108.
- Ruffner HP, Hawker J, Hale C (1976) TEMPERATURE AND ENZYMIC CONTROL OF MALATE METABOLISM IN BERRIES OF VITIS. *Phytochemistry* **15**, 1877–1880.
- Santesteban LG (2020) Strategies for adapting vineyards to a changing climate. (Re)-Learning from Mediterranean viticulture. *IVES Technical Reviews, Vine and Wine*. doi:10.20870/IVES-TR.2020.3788.
- Serra I, Strever A, Myburgh PA, Deloire A (2014) Review: the interaction between rootstocks and cultivars (*Vitis vinifera* L.) to enhance drought tolerance in grapevine: Rootstocks to enhance drought tolerance in grapevine. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **20**, 1–14. doi:10.1111/ajgw.12054.
- Statista (2022) Thème: Le marché international du vin. *Statista*. <https://fr.statista.com/themes/9911/le-marche-international-du-vin/>.
- Sweetman C, Sadras VO, Hancock RD, Soole KL, Ford CM (2014) Metabolic effects of elevated temperature on organic acid degradation in ripening *Vitis vinifera* fruit. *Journal of Experimental Botany* **65**, 5975–5988. doi:10.1093/jxb/eru343.
- Szabados L, Savouré A (2010) Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science* **15**, 89–97. doi:10.1016/j.tplants.2009.11.009.
- Torquebiau E, Mary F, Sibelet N (2002) Les associations agroforestières et leurs multiples enjeux. *Bois et Forêts Des Tropiques* **271**, 24–35.
- Trambouze W, Goma-Fortin N (2018) Agroforesterie viticole : résultats de 11 ans d'étude sur la production et la vigueur des vignes.

- Trouvelot S, Bonneau L, Redecker D, Van Tuinen D, Adrian M, Wipf D (2015) Arbuscular mycorrhiza symbiosis in viticulture: a review. *Agronomy for Sustainable Development* **35**, 1449–1467. doi:10.1007/s13593-015-0329-7.
- Un plan national de développement pour l'agroforesterie (2021) *Ministère Agric. Souveraineté Aliment.* <https://agriculture.gouv.fr/un-plan-national-de-developpement-pour-lagroforesterie>.
- Valentine AJ, Mortimer PE, Borgo R (2006) Drought responses of arbuscula mycorrhizal grapevines. *Symbiosis* **42**, 127–133.
- Vin et Société (2021) Chiffres clés. *Vin Société*. <https://www.vinetsociete.fr/chiffres-cles>.
- Wezel A, Bellon S, Doré T, Francis C, Vallod D, David C (2009) Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **29**, 503–515. doi:10.1051/agro/2009004.
- Williams LE, Ayars JE (2005) Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* **132**, 201–211. doi:10.1016/j.agrformet.2005.07.010.

Annexe



























Annexe 1 : Photos de la haie diversifiée de la parcelle (photos personnelles)

Stades phénologiques repères de la vigne

Auteurs: Bernard Bloesch et Olivier Viret, Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW, CP 1012, 1260 Nyon

Agroscope | AMTRA

0 Débourrement	1 Développement des feuilles	5 Apparition des inflorescences	6 Floraison	7 Développement des fruits	8 Maturation des baies														
Bourgeon d'hiver 00 (A) 	Sortie des feuilles 10 (D) 	Grappes nettement visibles 53 (F) 	Début floraison 61 	Nouaison 71 (J) 	Début véraison 81 (M) 														
La vigne pleure 00-01 (A) 	Développement des feuilles 11 (D-E) 	Boutons floraux agglomérés 55 (G) 	Floraison 62-63 	Développement des baies 73 	Véraison 83-85 														
Gonflement du bourgeon 01 (A) 	Deuxième feuille étalée 12 (E) 	Boutons floraux séparés 57 (H) 	Pleine fleur 65 (I) 	Développement des baies (stade petit pois) 75 (K) 	Pleine maturité 89 (N) 														
Bourgeon dans le coton 05 (B) 	Trois feuilles étalées 13 (E) 	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">Stades</p> <p>0 = Débourrement 1 = Développement des feuilles 5 = Apparition des inflorescences 6 = Floraison 7 = Développement des fruits 8 = Maturation des baies</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Code BBCH</th> <th>Code Baggiolini</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>00 → 09</td> <td>(A → Q)</td> </tr> <tr> <td>10 → 14</td> <td>(D → F)</td> </tr> <tr> <td>53 → 55</td> <td>(F → H)</td> </tr> <tr> <td>61 → 69</td> <td>(I → O)</td> </tr> <tr> <td>71 → 77</td> <td>(J → L)</td> </tr> <tr> <td>81 → 89</td> <td>(M → N)</td> </tr> </tbody> </table> </div>	Code BBCH	Code Baggiolini	00 → 09	(A → Q)	10 → 14	(D → F)	53 → 55	(F → H)	61 → 69	(I → O)	71 → 77	(J → L)	81 → 89	(M → N)	Fin de la floraison 67-69 	Fermeture de la grappe 77 (L) 	
Code BBCH	Code Baggiolini																		
00 → 09	(A → Q)																		
10 → 14	(D → F)																		
53 → 55	(F → H)																		
61 → 69	(I → O)																		
71 → 77	(J → L)																		
81 → 89	(M → N)																		
Pointe verte 09 (C) 	Quatre feuilles étalées, stade 53 possible 14 (E-F) 				Sources <ul style="list-style-type: none"> • Baggiolini M., 1952. Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. <i>Revue suisse de viticulture et d'arboriculture</i> 8 (1), 4-6. • Laucadio P. D., Buehler H., Van den Boom L., Langhans P., Stans R., Weber E. & Witzinger A., 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. <i>Ann. Appl. Biol.</i> 119, 561-601. • Bloesch B. & Viret O., 2008. Stades phénologiques repères de la vigne. <i>Revue suisse Vitic. Arboric. Hort.</i> 40 (6): I-IV. 														

Photographes: Giorgio Skory

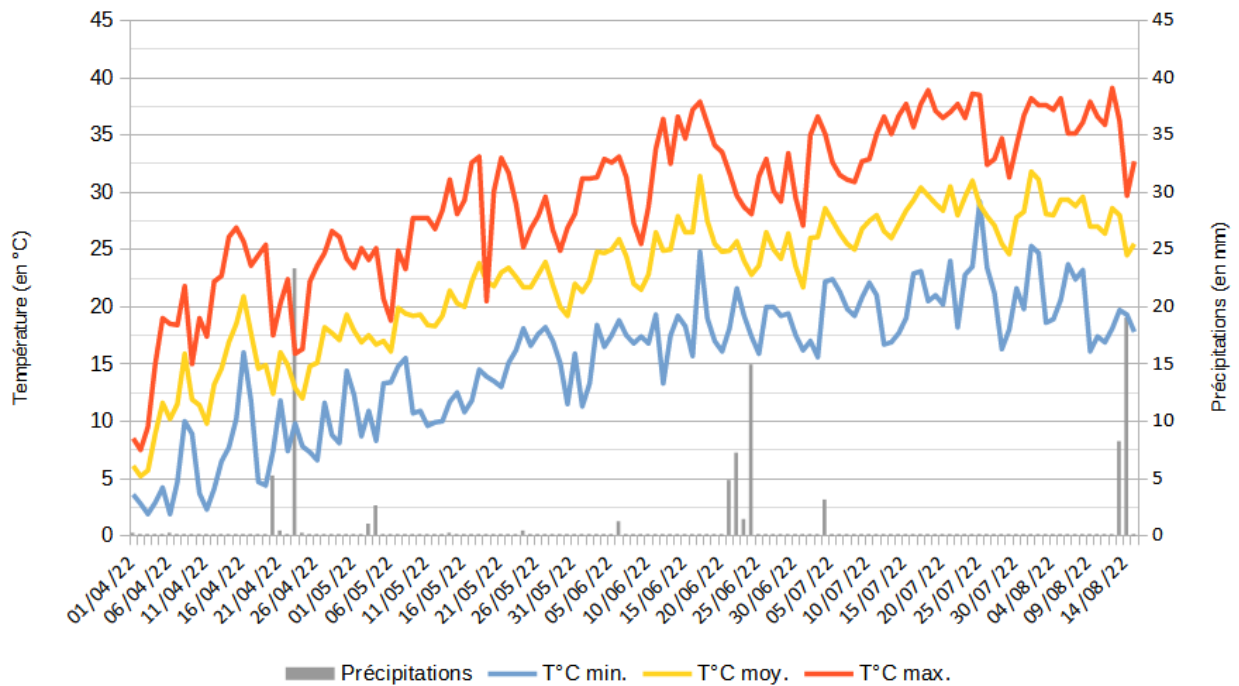
Annexe 2 : Echelle BBCH (Bloesch et Viret)



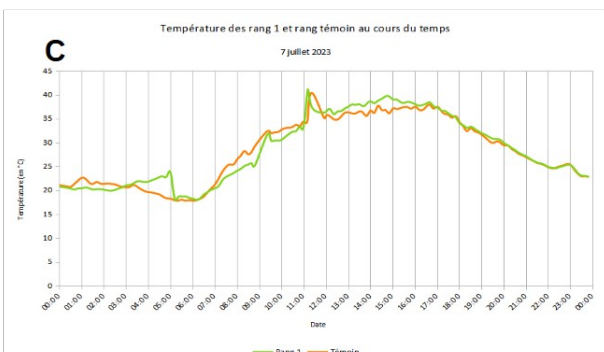
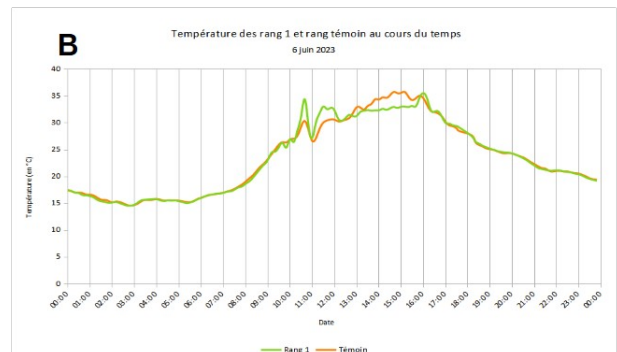
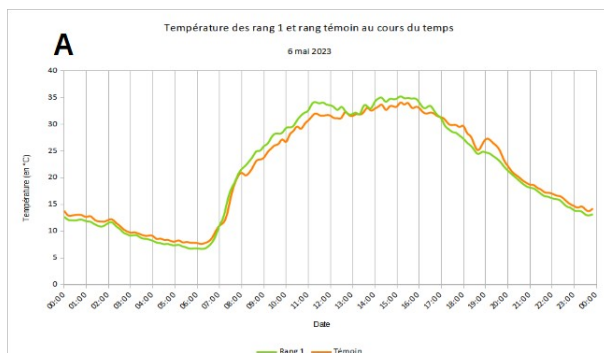
Annexe 3 : SPAD-502 Plus

(<https://www.indiamart.com/proddetail/spad-502-plus-chlorophyll-meter-13814893397.html>)

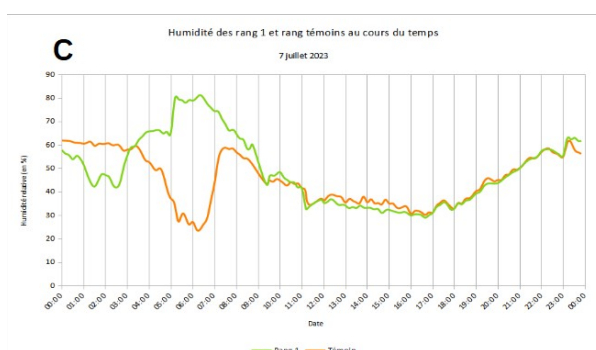
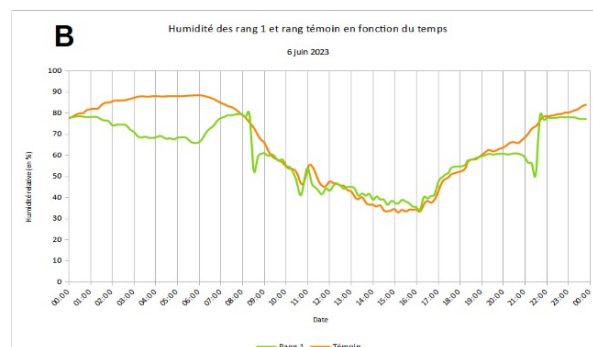
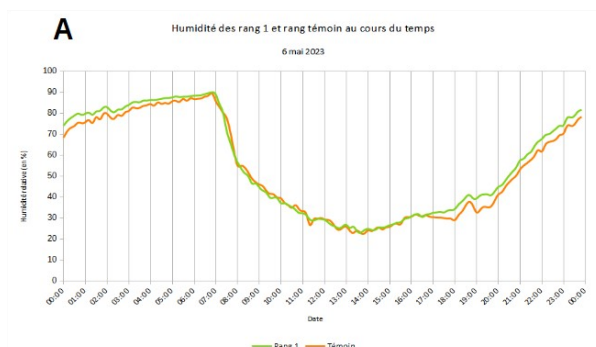
Données climatiques à Orange du 1er Avril au 15 Août 2022



Annexe 4 : Données météo de 2022 à Orange (<https://www.meteo-concept.fr/>)



Annexe 5 : Courbe de température sur une journée de mai (A), juin (B) et juillet (C) en 2023



Annexe 6 : Courbe de l'humidité relative sur une journée de mai (A), juin (B) et juillet (C) en 2023



Annexe 7 : Alvéoles occupées par des nids d'abeilles solitaires (photo personnelle)

