



Université
de Toulouse



**MASTER 1 Mention GAED
Parcours TRENT
Rapport de stage 2022 – 2023**

Impact des conditions climatiques sur la physiologie des plantes en climat méditerranéen

Étude menée dans les secteurs de l'arboriculture et de la viticulture avec l'outil PEPISTA®



Soutenu le 7 Septembre 2023
par BAILLY Léo

Sous la direction de :
Tuteur de stage : BROUSSARD Nathalie
Enseignant-référent : BRIANE Gérard



Résumé

Cette étude examine l'impact des facteurs climatiques sur les courbes dendrométriques, à travers 2 paramètres : la croissance et l'amplitude de contraction journalière de la végétation en arboriculture et viticulture, est ce dans un climat méditerranéen. En utilisant la technique de la micromorphométrie avec l'outil Pepista, des données de la société Agroressources ont été analysées et comparées à des données bibliographiques afin d'évaluer les réponses de certaines espèces végétales (olivier, pêcher, pommier et vigne) face à des facteurs climatiques spécifiques.

Les résultats obtenus révèlent des variations significatives dans la croissance et l'amplitude de contraction journalière des espèces végétales étudiées. La perte en eau issue des réserves internes de la plante semble être initiée par l'ensoleillement. Les vents faibles ont été associés à une augmentation de la photosynthèse. En revanche, les vents forts ont réduit la croissance et diminué l'amplitude de la végétation observée sauf sur pommier. Les fortes chaleurs augmentent les amplitudes et ne semblent pas affecter la croissance secondaire si la disponibilité en eau est suffisante. Dans le cas de fortes températures cumulées à un manque d'eau un stress est observé en plus de l'augmentation des amplitudes.

Par ailleurs, l'humidité a joué un rôle prépondérant dans la croissance et l'amplitude des espèces étudiées. Les conditions d'humidité faible ont ralenti la croissance des espèces, soulignant l'importance de l'équilibre hydrique pour le développement optimal de la végétation. Cette étude met en évidence l'importance de prendre en compte l'ensemble des variables climatiques afin d'optimiser au mieux la croissance secondaire des végétaux étudiés.

Par la recherche bibliographique, il est mis en évidence certains effets du dérèglement climatique, souvent néfastes à l'arboriculture et à la viticulture. De fait, l'adaptation semble inévitable afin de garder en France une production fruitière et viticole permettant le maintien de ce secteur d'activité indispensable à l'agriculture de la région méditerranéenne.

Summary

This study examines the impact of climatic factors on dendrometric curves through two parameters: the growth and daily contraction amplitude of vegetation in arboriculture and viticulture, specifically in a Mediterranean climate. Using micromorphometry techniques with the Pepista tool, data from Agroressources were analyzed and compared to bibliographic data to assess the responses of certain plant species (olive trees, peach trees, apple trees, and grapevines) to specific climatic factors.

The results obtained reveal significant variations in the growth and daily contraction amplitude of the studied plant species. Water loss from the plant's internal reserves appears to be initiated by sunlight. Weak winds have been associated with increased photosynthesis. On the other hand, strong winds reduced growth and decreased vegetation amplitude observed, except for apple trees. High temperatures increase amplitudes and do not seem to affect secondary growth if water availability is sufficient. In the case of high temperatures combined with a lack of water, stress is observed in addition to increased amplitudes.

Furthermore, humidity played a predominant role in the growth and amplitude of the studied species. Low humidity conditions slowed the growth of the species, highlighting the importance of water balance for optimal vegetation development. This study underscores the importance of considering all climatic variables to optimize the secondary growth of the studied plants.

Through a literature review, certain effects of climate change, often detrimental to arboriculture and viticulture, are highlighted. Consequently, adaptation seems inevitable to maintain fruit and grape production in France, essential for the agriculture of the Mediterranean region.

Remerciements

En ouverture de ce dossier, il me semble opportun d'exprimer ma sincère reconnaissance envers ceux qui ont joué un rôle déterminant tout au long de mon stage. Il est important pour moi de prendre un moment pour exprimer ma gratitude envers Mme. BROUSSART Nathalie, mon maître de stage, pour son soutien constant, sa patience et sa générosité dans le partage de ses connaissances. Sa formation m'a permis d'acquérir des compétences précieuses.

Je tiens également à adresser mes remerciements à Rosine et Adrien, dont l'ouverture à répondre d'innombrables questions et la bienveillance dont ils ont fait preuve ont grandement contribué au bon déroulé de ce stage.

De plus, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers M. BRIANE, mon enseignant référent pour ce stage, pour sa très grande disponibilité et réactivité à toutes les sollicitations que j'ai pu lui adresser.

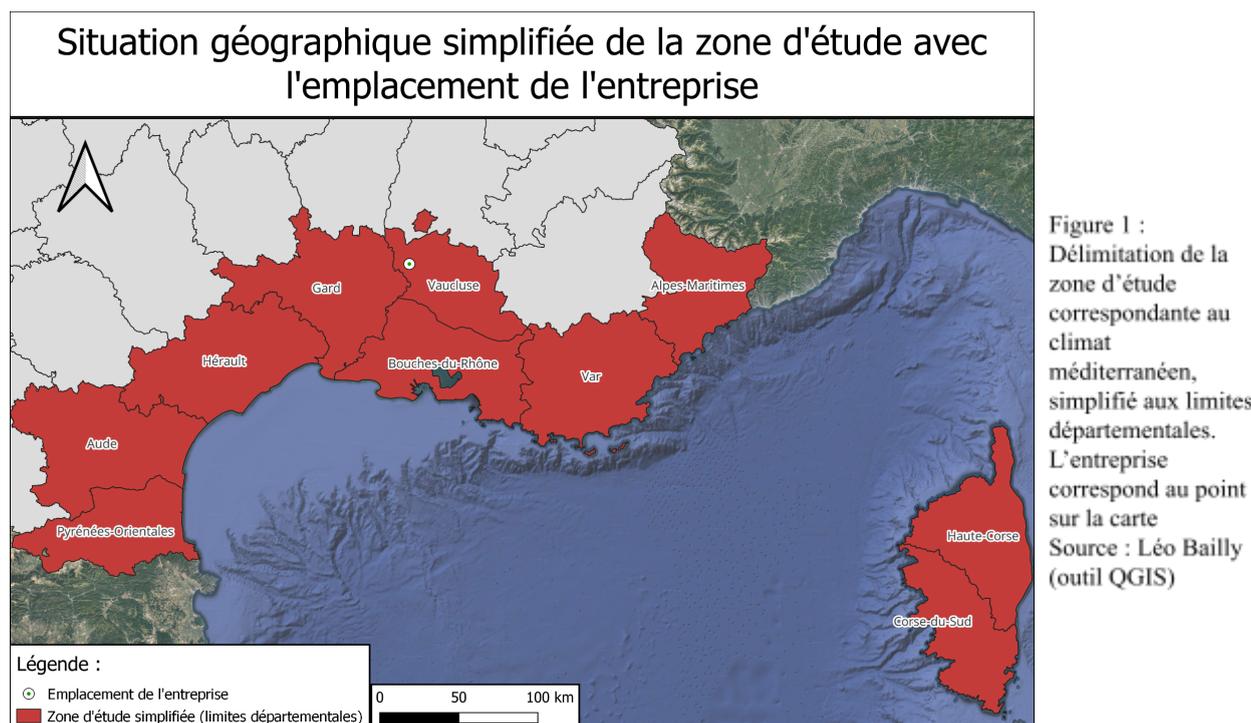
Je ne saurais oublier de remercier l'ensemble des enseignants et intervenants qui ont contribué à ma formation. Leurs enseignements, leurs conseils avisés et leur implication ont été fondamentaux dans ma progression. Que ce soit au cours de cette année ou des précédentes, je suis conscient de devoir une part importante de mes connaissances à leur engagement.

En bref, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers toutes ces personnes, car c'est grâce à leur soutien et à leur expertise que je suis en mesure de présenter ce dossier aujourd'hui avec confiance et satisfaction.

Introduction.....	5
Problématique du mémoire.....	6
Intérêt et dynamique de la transition environnementale dans le domaine de l'arboriculture et de la viticulture.....	6
Présentation rapide de la structure Agro-Ressources.....	7
I) Contexte du stage.....	7
Présentation de la structure Agro-Ressources (historique, objectifs, actions, contexte, fonctionnement, etc.).....	7
Contexte géographique.....	8
Présentation des missions du stage et leur demande.....	9
Présentation générale du territoire d'étude (climat méditerranéen) avec supports cartographiques...	10
Contexte climatique de l'année 2022 en région méditerranéenne.....	14
II Cadre théorique: enjeux du stage dans le domaine de l'arboriculture et de la viticulture... 	16
Enjeux spécifiques de l'arboriculture et de la viticulture en lien avec le climat (sources scientifiques et de terrain).....	16
État de l'art des méthodes de suivi dans le secteur de l'arboriculture et de la viticulture impliqué (notamment via l'outil PEPISTA®) pour comprendre l'impact des conditions climatiques sur ces cultures.....	17
III Cadre méthodologique: démarche méthodologique du stage.....	22
Outil Pepista®.....	22
Les sondes tensiométriques.....	26
La station météo.....	27
Echantillonnage.....	28
IV Résultats: présentation et analyse des résultats obtenus.....	29
Facteurs climatiques influençant la croissance secondaire.....	29
Température de l'air.....	30
L'ensoleillement.....	31
Humidité relative de l'air.....	34
Cas particulier : le vent	35
La disponibilité en eau.....	37
Autres perturbation à prendre en considération.....	41
L'arboriculture et la viticulture face aux dérèglements climatiques.....	42
V Discussion: mise en perspective et retour critique sur le stage.....	51
Perspective d'optimisation de l'arboriculture et de la viticulture pour faire face aux facteurs climatique.....	51
Perspective d'amélioration de l'étude.....	51
Retour d'expérience : apport et limites du stage.....	52
Lien avec le master TRENT.....	52
VI Conclusion.....	54
Bibliographie.....	56
Annexes.....	64

Introduction :

Le thème central de ce mémoire de stage porte sur l'impact des conditions climatiques en arboriculture et viticulture sous climat méditerranéen à l'échelle de la France métropolitaine (*Figure 1*), une région climatique reconnue pour son importance dans la production nationale de fruits (PLENET.D et al., 2010 (sur pêche)) et de vin (des graphiques issus des données de l'Agreste présentent en annexe 1 la production des départements sous climat méditerranéen). L'objectif principal de cette étude est de comprendre comment les conditions climatiques influencent la croissance, et la demande hydrique des d'arbres fruitiers et des vignes, en utilisant les données bibliographiques disponibles ainsi que les résultats obtenus durant le stage grâce à l'outil PEPISTA®.



L'étude se concentre sur la région climatique méditerranéenne en raison de son rôle majeur dans l'arboriculture et la viticulture française (Annexe 1) avec des conditions climatiques parfois difficiles pour le monde agricole soumis aux étés chauds et secs qui caractérise cette région. Les variations climatiques, surtout les températures, les précipitations et l'humidité, ont un impact significatif sur les cultures de la région. Comprendre comment ces facteurs climatiques impactent les plantes est essentiel pour améliorer la gestion de ces cultures et développer des pratiques agricoles plus durables.

De plus, le dérèglement climatique, la raréfaction de la ressource en eau et un futur climatique incertain engendre nombre d'inquiétudes légitimes de la part des agriculteurs et de toute personne soucieuse de l'agriculture française et de son environnement.

L'outil PEPISTA® est un dendromètre, qui est utilisé dans cette étude, afin de garantir une analyse fine de la physiologie des plantes via leurs caractéristiques morphologiques. PEPISTA® est un capteur micromorphométrique qui permet de mesurer en temps réel l'état hydrique des plantes. Il opère par le biais de micro-variations permettant l'analyse des variations de grossissement du diamètre journalier des tissus de végétaux, fournissant ainsi des données sur l'activité hydrique des plantes. Il peut être utilisé pour piloter les irrigations et faire des expérimentations. En combinant les données issues de l'outil PEPISTA® avec des mesures météorologiques, il est possible de mieux

comprendre comment les cultures réagissent aux variations climatiques de type méditerranéen. En effet, le diamètre d'une branche évolue de plusieurs centièmes de millimètres chaque jour suivant les conditions environnementales, géographiques et hydriques du site. (PEARSON, 1924; DOBBS and SCOTT, 1971; KOZLOWSKI, 1972 ; BRAEKKE and KOZLOWSKI, 1975; HUGUET et al., 1985 ; IRVINE and GRACE, 1997).

L'objectif ultime de cette étude est de fournir des informations scientifiques et pratiques dans le domaine de l'arboriculture et de la viticulture. En comprenant les effets des conditions climatiques sur ces cultures, il devient possible d'adapter les pratiques de gestion de la ressource en eau, pour optimiser les rendements, prévenir les risques liés au climat et promouvoir une agriculture plus résiliente face aux changements environnementaux.

Problématique :

Ce mémoire de stage se focalise sur l'impact des conditions climatiques en arboriculture et viticulture observées sous climat méditerranéen, avec la problématique suivante :

"Comment l'utilisation de la technologie (via l'outil PEPISTA®) peut-elle nous permettre de mieux comprendre l'impact des conditions climatiques sur la physiologie des espèces utilisées dans l'arboriculture et la viticulture ?"

L'étude menée va analyser la réponse physiologique des plantes via leurs caractéristiques morphologiques afin de mieux comprendre l'impact de divers facteurs climatiques.

Ce rapport est effectué dans le cadre d'un Master TRENT signifiant TRansition ENvironnementale des Territoires. La transition environnementale revêt une importance capitale dans le domaine de l'arboriculture et de la viticulture. Ces secteurs agricoles sont directement confrontés aux défis posés par le changement climatique et la pression croissante sur les ressources naturelles.

Intérêt et dynamique de la transition environnementale dans le domaine de l'arboriculture et de la viticulture :

La transition environnementale vise à promouvoir des pratiques agricoles durables, respectueuses de l'environnement et économiquement viables. Dans le contexte de l'arboriculture et de la viticulture en région méditerranéenne, la transition environnementale s'avère essentielle pour garantir la pérennité de ces activités et atténuer leurs impacts sur l'écosystème.

Les dynamiques environnementales, telles que les variations climatiques, les événements extrêmes, la disponibilité en eau et la biodiversité, exercent une influence directe sur les cultures. Le changement climatique se traduit par la modification des régimes de température, et de nouveaux schémas de précipitations (GIEC, 2014) ce qui a un impact significatif sur les cultures et leurs rendements.

Dans ce contexte, les enjeux environnementaux se manifestent à plusieurs niveaux. Tout d'abord, la variabilité climatique et les épisodes de stress hydrique peuvent compromettre la résilience des cultures, augmenter les risques de maladies et de ravageurs, et réduire les rendements et la qualité des productions (GIEC, 2023). Il est donc primordial de mieux comprendre les mécanismes par lesquels les conditions climatiques affectent la physiologie et la croissance des arbres fruitiers et des vignes.

Présentation rapide de la structure Agroressources :

C'est au sein de l'entreprise Agroressources que j'ai pu durant 5 mois réaliser mon stage. Cette entreprise est spécialisée dans la gestion des irrigations. Elle propose des solutions de pilotage des irrigations en combinant diverses mesures pour optimiser l'utilisation de l'eau, améliorer les performances des cultures et préserver la qualité des productions. L'équipe d'Agroressources fournit des conseils personnalisés aux agriculteurs (principalement implanté en région PACA) en utilisant des outils tels que le capteur Pepista®, les sondes tensiométriques et réalise en plus de cela des analyses de solution du sol permettant à l'agriculteur de disposer de toutes les informations nécessaires afin d'effectuer l'irrigation adéquat. Mais elle réalise également des formations ainsi que de la vente de matériel en lien avec l'irrigation, la fertilisation, la météorologie, et la qualité des fruits. Agroressources propose du matériel à la vente et à la location. L'entreprise s'adapte aux besoins spécifiques de chaque client et contribue à une utilisation raisonnée des ressources en eau et fertilisant agricole, favorisant une agriculture résiliente et plus respectueuse de l'environnement.

Ce rapport de stage se structure de la manière suivante : le premier chapitre présente le contexte du stage en détaillant l'entreprise Agroressources, ses objectifs, ses actions, son fonctionnement, les missions spécifiques du stage ainsi que le territoire concerné par l'étude. Le deuxième chapitre aborde le cadre théorique en mettant en évidence les enjeux de la problématique du stage dans le domaine de l'arboriculture et de la viticulture, notamment en relation avec le climat, et présente l'état de l'art des méthodes de suivi utilisées, en particulier l'outil PEPISTA®. Le troisième chapitre détaille la démarche méthodologique du stage, en mettant l'accent sur l'utilisation de la micromorphométrie via l'outil PEPISTA®, et présente les méthodes utilisées pour mener à bien les missions. Le quatrième chapitre présente et analyse les résultats obtenus, en mettant en avant les principaux résultats issus des missions et travaux réalisés. Ils sont ensuite interprétés, et croisés avec d'autres données et/ou comparé à des études similaires. La 2ème partie des résultats traite d'une analyse principalement bibliographique de l'impact du dérèglement climatique sur l'arboriculture et la viticulture. Le cinquième chapitre propose une discussion critique sur le stage, en évaluant les apports et les limites de celui-ci, en faisant le lien avec les compétences mobilisées dans le cadre du master TRENT, et en proposant des perspectives d'optimisation dans le domaine de l'arboriculture et de la viticulture. Enfin, la conclusion synthétise les résultats obtenus et répond à la problématique du mémoire en se basant sur les éléments discutés tout au long du rapport, offrant ainsi une vision globale de l'étude réalisée.

I) Contexte du stage

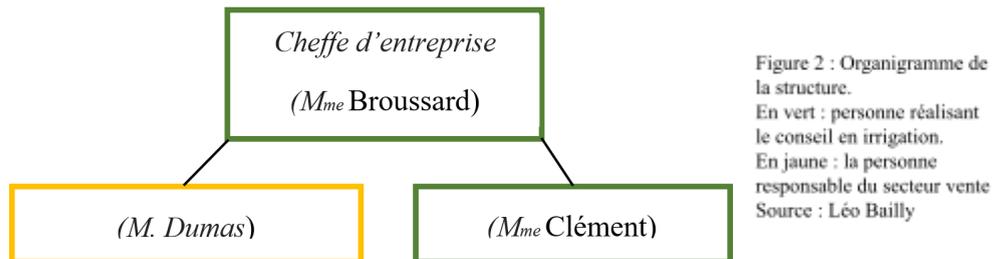
Présentation de la structure Agroressources (historique, objectifs, actions, contexte, fonctionnement, etc.) :

Agroressources, fondée en 1993 par Patrice Guinet, ingénieur en agriculture diplômé de l'ISA Lille, est une entreprise spécialisée dans le conseil agricole sur diverses cultures, ayant une prédominance pour l'arboriculture et la viticulture. Patrice Guinet a développé une méthode spécifique de pilotage des irrigations en combinant diverses mesures, tel que l'outil de la marque PEPISTA® qui lui a été transféré de M. Jean Gérard HUGUET de l'INRAE d'Avignon.

Cette approche intègre les mesures de l'état hydrique de la plante relevé par le capteur micromorphométrique Pepista® de l'INRAE, les mesures de disponibilité en eau dans le sol obtenues

grâce aux sondes tensiométriques, ainsi que les données météorologiques spécifiques à chaque exploitation. L'objectif est d'optimiser les rendements par une meilleure gestion de l'irrigation.

Dirigée depuis 2017 par Nathalie Broussard, cheffe d'entreprise, l'équipe d'Agroressources comprend également deux autres collaborateurs (Figure 2). *M^{me}* Broussard et sa collègue sont spécialisées dans le conseil en irrigation qu'elles effectuent chaque début de semaine, tout au long de la saison. Elles utilisent les outils Pepista® ainsi que les sondes tensiométriques pour fournir des conseils personnalisés aux agriculteurs, les aidant ainsi à améliorer leur gestion de l'eau et à augmenter leurs rendements. Un troisième membre de l'équipe est responsable de l'activité vente des appareils de mesure, gestion des commandes, renseignement auprès des clients et service après ventes.



Pour l'activité «conseil en irrigation», les clients d'Agroressources sont principalement des agriculteurs implantés dans le sud-est de la France, mais l'entreprise travaille aussi pour des agriculteurs au Maroc et en Moldavie. Elle offre également ses services à des instituts de recherche, dans le cadre de projet d'expérimentation (actuellement sur les effets de la restriction d'eau et des engrais verts pour l'arboriculture et la viticulture)

De par ses actions, l'entreprise s'inscrit dans la transition environnementale en proposant des outils et des services favorisant une gestion durable des ressources en eau, contribuant ainsi à promouvoir une agriculture résiliente et respectueuse de l'environnement.

Contexte géographique de l'entreprise

Agroressources est implanté à Orange, une commune située dans le département du Vaucluse, en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, dans le sud de la France. Cette localisation géographique présente des caractéristiques propices pour l'entreprise (Figure 1, p.5).

En effet, la région méditerranéenne est réputée pour son climat engendrant des étés chauds et secs ainsi que des hivers doux (TASSIN.C, 2012 ; JOLY. D, 2010) . Ce contexte climatique offre des conditions propices à l'agriculture et à la production de cultures variées, mais les étés secs imposent à grand nombre d'agriculteurs d'implanter un système d'irrigation. Certains, par souci d'augmenter leur rendement et faire face aux restrictions d'eau, souhaite avoir recours à des spécialistes dans ce domaine afin d'être conseillés, ce qui représente autant de clients potentiels pour la société.

La proximité d'Avignon, un important centre économique régional, constitue également un avantage pour l'entreprise. Cette ville historique et culturelle offre une proximité avec le pôle agronomique «Agroparc», avec la chambre d'agriculture, l'INRAE et l'université d'Avignon d'où proviennent les deux salariés de la société.

Du point de vue des infrastructures, la région bénéficie d'un réseau routier bien développé, avec notamment l'autoroute A7 et A9, qui facilite les liaisons avec d'autres villes et régions

importantes. Infrastructures indispensables à l'entreprise qui réalise régulièrement (4 à 5 fois dans la saison) des visites chez ces clients parfois implanté à plus d'une heure de route (Figure 3).

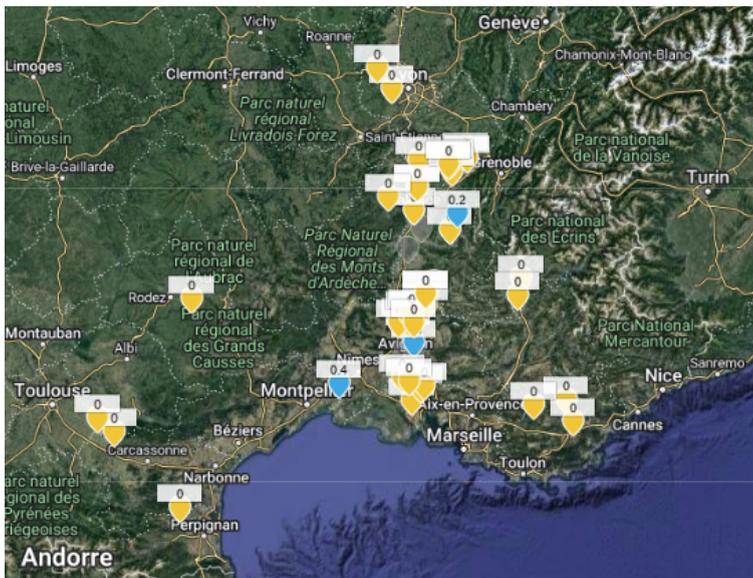


Figure 3 : Carte situant géographiquement les clients d'Agrossources ayant une station météo (les chiffres visible sur cette figure indique la pluie durant les 24 dernière heures).
Source : Fieldclimate

Présentation des missions du stage et leur demande (contextualisation des enjeux pour la structure) :

Durant mon stage en entreprise, j'ai principalement été engagé dans la manipulation et l'analyse de données utilisées pour le conseil en irrigation, avec un accent particulier sur l'exploitation des données issues de l'outil Pepista. Cette activité a constitué mon objectif principal et m'a permis de procéder à des analyses approfondies visant à comprendre l'impact des conditions climatiques sur la physiologie des plantes, au travers du suivi de la croissance et de l'amplitude (état hydrique de la plante).

En complément de cette activité, j'ai également eu l'opportunité de participer à d'autres tâches. J'ai ainsi effectué la préparation des courbes Pepista pour les conseillères, ce qui m'a permis de voir en «temps réel» l'impact du climat de 2023 sur les cultures. J'ai aussi effectué des analyses de solution du sol, contribuant à l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques du sol. De plus, j'ai participé à des sorties sur le terrain afin de procéder à l'installation de dispositifs de mesure, notamment les équipements Pepista et Monitor. Ces sorties m'ont permis d'acquérir une expérience pratique dans la mise en place des capteurs, leurs calibrages et la collecte de données sur les plantes.

Parallèlement à ces activités techniques, j'ai entrepris des recherches bibliographiques approfondies sur les espèces étudiées au sein de l'entreprise. Cette démarche m'a permis d'approfondir mes connaissances sur la physiologie végétale, les exigences climatiques spécifiques à chaque espèce et les réponses des cultures aux variations environnementales. En consolidant mes connaissances scientifiques, j'ai pu mieux appréhender les mécanismes d'adaptation des plantes aux contraintes climatiques.

Présentation générale du territoire d'étude :

Caractéristique climatique :

Le territoire d'étude traité dans ce rapport est délimité par la région climatique française qui bénéficie d'un climat méditerranéen dit « franc » (JOLY. D et al., 2010 ; Figure 4). Ce contexte climatique occupe une bande étroite autour de la mer méditerranée, des Pyrénées au Var. Il se rétrécit dans les Alpes maritimes et s'élargit de la Camargue à l'Ardèche. Les températures sont élevées avec peu de jours froids et beaucoup de jours chauds, engendrant davantage de sécheresse. Les précipitations d'automne sont bien plus abondantes que celles de l'été (JOLY. D et al., 2010). Cette sécheresse est souvent compensée par une saison hivernale plus humide, caractérisée par des précipitations plus abondantes, ce qui permet de reconstituer partiellement les réserves hydriques (TASSIN. C, 2012 ; Météofrance). Toutefois, les réserves hydriques tendent à s'amoinrir à cause de leur surexploitation par l'homme cumulé au dérèglement climatique (GIEC). Ces fluctuations thermiques et hydriques impactent les pratiques agricoles, en particulier dans les domaines de l'arboriculture et de la viticulture fortement implantées sur le territoire selon l'Agreste (stats.agriculture.gouv.fr) et les données du ministère de « l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire ».

Les différents types de climat en France

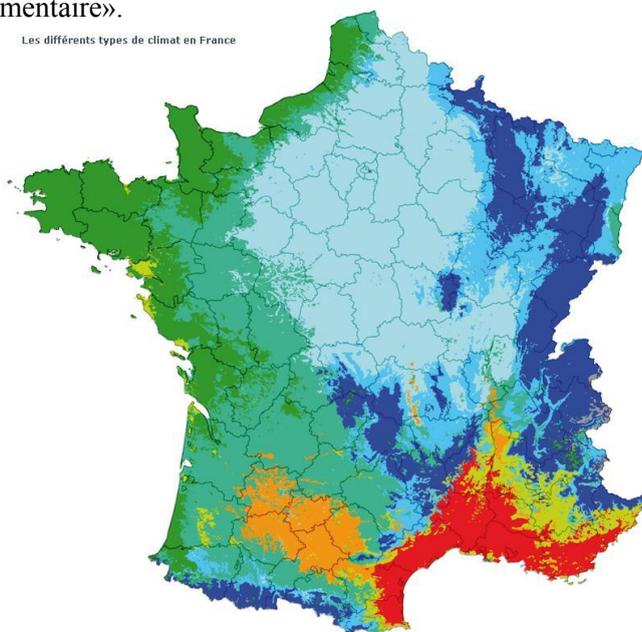
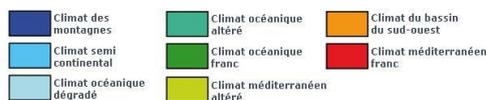


Figure 4 : Carte permettant de visualiser la répartition et la délimitation des régions climatiques française.
Source : JOLY. D et al., 2010



En climat méditerranéen les épisodes pluvieux sont répartis de façon irrégulière sur l'année. « À des hivers et étés secs succèdent des printemps et automnes très arrosés, souvent sous forme d'orages (40 % du total annuel en 3 mois) » (Météofrance). De plus, le territoire est régulièrement soumis à des vents violents (Météofrance) principalement le Mistral et la Tramontane (Figure 5). Ces conditions climatiques particulières n'empêchent pas la culture de certaines variétés fruitières ainsi que la culture de la vigne.



Figure 5 : Les différents type de vents présent sur le contour méditerranéen français
Source : SCAVINER. P, 2009 (lachainemeteo)

Le climat méditerranéen présente plusieurs caractéristiques distinctives. Comme évoqué précédemment, les étés sont chauds et secs, avec des moyennes du mois le plus chaud atteignant pour Marseille 24°C (TASSIN. C, 2012), les hivers parfois secs (TASSIN. C, 2012 ; Météofrance) garde des températures relativement douces, avec une moyenne du mois le plus froid à Marseille de 7°C (TASSIN. C, 2012) . Les amplitudes thermique annuelle sont de l'ordre de 17°C pour Marseille, en comparaison Brest à une amplitude thermique annuelle d'environ 10°C (TASSIN. C, 2012).(Ces données ont été observé sur 30 à 40 ans)

Les variations de température sont donc significatives à la fois au cours de la journée et au fil des saisons. Les journées chaudes sont souvent suivies de nuits plus fraîches, entraînant des écarts de température importants. De plus, les transitions saisonnières se manifestent par des changements marqués de température et de conditions climatiques.(TASSIN. C, 2012)

Le climat méditerranéen peut être divisé en deux types principaux (Figure 3) : le climat méditerranéen altéré et le climat méditerranéen franc. Le climat méditerranéen altéré se rencontre généralement dans les régions côtières, où l'influence de la mer modère les conditions climatiques. Les étés y sont chauds et secs, tandis que les hivers sont doux et pluvieux. Ce climat présente des variations plus prononcées en termes de température et de précipitations par rapport au climat méditerranéen franc. Il peut connaître des périodes de sécheresse plus fréquentes et prolongées, ainsi que des hivers plus frais avec des précipitations plus abondantes.(TASSIN. C, 2012 ; JOLY. D, 2010)

Le climat méditerranéen franc est considéré comme le climat méditerranéen classique, (c'est pourquoi nous parlerons de climat méditerranéen sans spécifier à chaque fois qu'il s'agit du «franc») il prédomine généralement dans les régions situées plus à l'intérieur des terres, éloigné de l'influence modératrice de la mer. Il convient de noter que ces descriptions générales peuvent varier en fonction de la localisation géographique précise et des caractéristiques topographiques de chaque région. Les particularités locales peuvent influencer les conditions climatiques et introduire des nuances supplémentaires dans les sous-types de climat méditerranéen.

Sur le plan de la végétation, le climat méditerranéen favorise la croissance d'une végétation adaptée à la sécheresse, telle que le maquis, la garrigue et les forêts de feuillus persistants. Les cultures typiques de la région incluent les oliviers, les vignes, les arbres fruitiers et les plantes aromatiques, qui sont bien adaptés aux conditions climatiques spécifiques mais nécessitent une surveillance de l'irrigation, surtout lors des années particulièrement sèches comme en 2022. La gestion de la ressource en eau est essentielle dans ce type de territoire complexe. (TASSIN. C, 2012 ; RAMBAL. R, 2002)

Caractéristiques géomorphologiques et topographiques :

La géomorphologie du territoire présente une grande diversité, allant des plaines aux vallées fluviales en passant par les collines. Cette variabilité altitudinale influe sur la disponibilité en ensoleillement, les variations de température et les caractéristiques hydriques locales. Les pentes des collines jouent également un rôle dans la sélection des cultures en fonction de leur adaptation aux expositions et aux inclinaisons spécifiques notamment avec le facteur de ruissellement (BOIFFIN. J et al., 1988)

La figure 6 illustre la pédologie française avec un inventaire des sols. Nous en retiendrons ici l'hétérogénéité des sols de la région méditerranéenne, tels que les sols calcaires, argileux, sableux et

limoneux. Chacun de ces types de sols présente des propriétés physiques, chimiques et hydrologiques distinctes, ce qui influe sur la fertilité, le drainage et la rétention d'eau. (INRAE INFOSOL d'Orléans, 2007) Carte des sols dominants de France

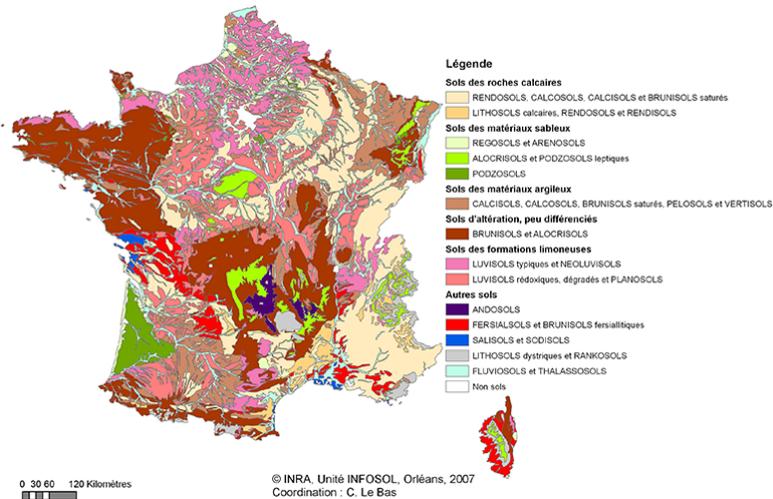


Figure 6 : Carte illustrant les sols dominants de France. Source : INRAE unité INFOSOL d'Orléans, 2007

L'arboriculture et la viticulture du territoire

L'arboriculture occupe une place prépondérante dans le territoire d'étude avec environ 35% de la production nationale fruitière (Figure 8 ; Chiffre issu de l'Agreste), avec une diversité de cultures fruitières telles que les pommiers, les cerisiers, les oliviers, les pruniers, les poiriers, les abricotiers et les pêchers. Ces cultures sont spécifiquement adaptées aux conditions climatiques méditerranéennes et contribuent de manière significative à la dynamique agricole de la région. Parallèlement, la viticulture est également une activité majeure, avec des vignobles réputés pour la production de vins. Environ 41% du raisin de cuve est produit sous climat méditerranéen (Figure 9 ; Chiffres issus de l'Agreste). La carte ci-dessous (Figure 7) nous permet de visualiser l'importance surfacique et donc économique de l'arboriculture et de la viticulture pour le territoire d'étude. Part de la production fruitière sélectionnée en climat méditerranéen sur la production française

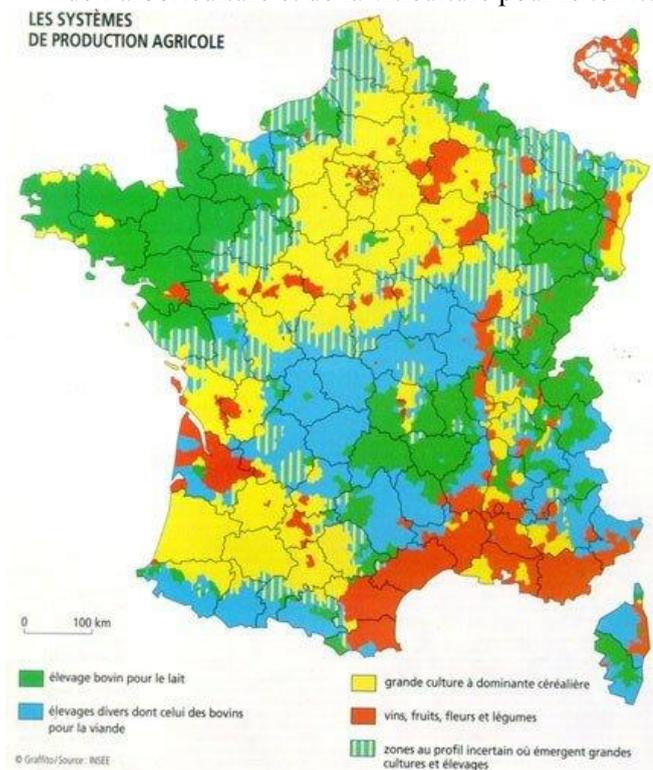


Figure 7 : Carte permettant de visualiser la répartition des différents types d'agriculture exploitée par l'agriculture française. Source : INSEE

Part de la production fruitière sélectionnée en climat méditerranéen sur la production française

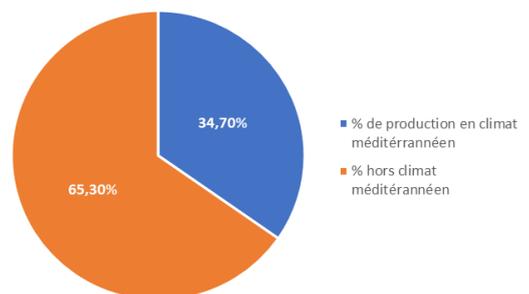


Figure 8 : Production de fruit en zone d'étude. Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données de l'Agreste

Part de la production viticole en climat méditerranéen sur la production française

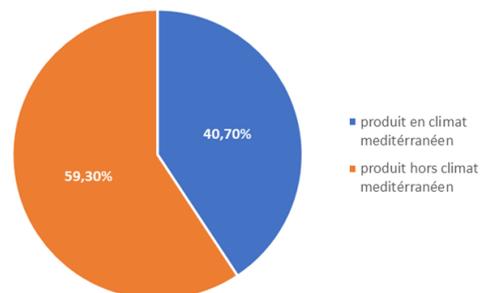


Figure 9 : Production de raisin de cuve en zone d'étude. Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données de l'Agreste

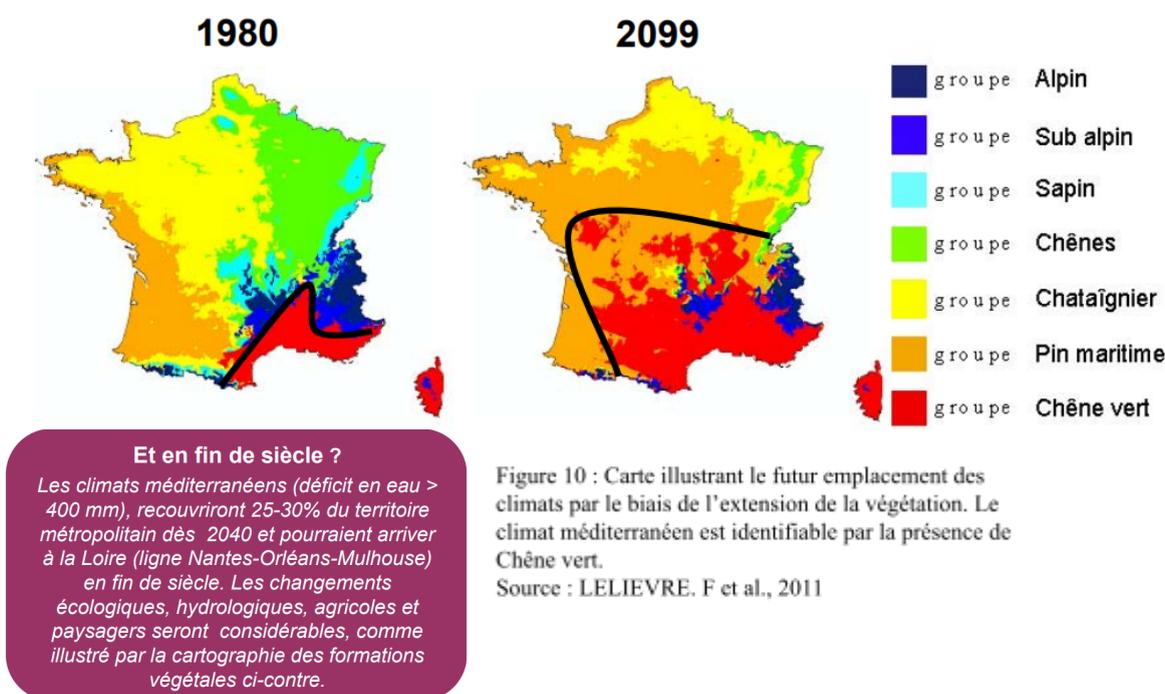
Justification du choix du territoire d'étude :

Le choix de délimiter le territoire d'étude à une région climatique française et plus particulièrement au climat méditerranéen dit « franc » repose sur la concentration importante d'activités d'arboriculture et de viticulture dans cette zone. La présence de ces cultures fruitières et de vignobles offre une opportunité pour étudier les interactions entre le climat méditerranéen et la végétation ligneuse agricole.

Par ailleurs, la majorité des clients d'Agroressources se situe sur ce territoire d'étude et sont en arboriculture ou en viticulture. Cette délimitation territoriale permet une disponibilité abondante de données recueillies par Agroressources pour ces clients avec les outils Pepista, Monitor et les stations météorologiques pendant une période prolongée (depuis au moins 2016). L'existence de ces données sur une durée significative permet une analyse approfondie des réponses des cultures aux conditions climatiques dans le domaine de l'arboriculture et de la viticulture.

De plus, il s'agit de culture pérenne avec entre 15ans et 50ans de durée de production en moyenne, l'adaptation aux dérèglements climatiques est donc capitale. Cette approche territoriale présente ainsi l'avantage d'accéder à une multitude d'informations et de données, favorisant une analyse scientifique des tendances, des variations et des impacts climatiques sur les cultures étudiées. Cette méthodologie basée sur des données fiables et à long terme renforce la validité des résultats obtenus et fournit des connaissances précieuses pour éclairer les décisions et les stratégies agricoles adaptées aux conditions spécifiques du climat méditerranéen.

De plus, avec le dérèglement climatique le climat méditerranéen qu'il soit modéré ou franc concernera dans un futur proche ou moyen une superficie de plus en plus vaste (Figure 10) , impactant ainsi un nombre croissant d'agriculteurs (LELIEVRE. F et al., 2011). Comme le montre l'annexe 2 sur l'évolution du climat en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, le dérèglement climatique rendra l'agriculture plus complexe.



Contexte climatique de l'année 2022 en région méditerranéenne (à Orange)

La figure ci-dessous illustre graphiquement la pluviométrie et la température moyenne à Orange pour l'année 2022 du débourrement de la vigne jusqu'à la récolte comparé aux années passées. On constate alors que l'année 2022 a été l'année la plus chaude et la moins pluvieuse de toutes les années relevées sur ce graphique (1969-2022). On constate également que depuis les années 2000, 5 années sont en "Frais et humide", 4 en "chaud et humide", 1 en "frais et sec" et 13 en "chaud et sec". On observe ici la dynamique du dérèglement climatique si souvent démontrée par les experts. (GIEC, 2023 ; 2014)

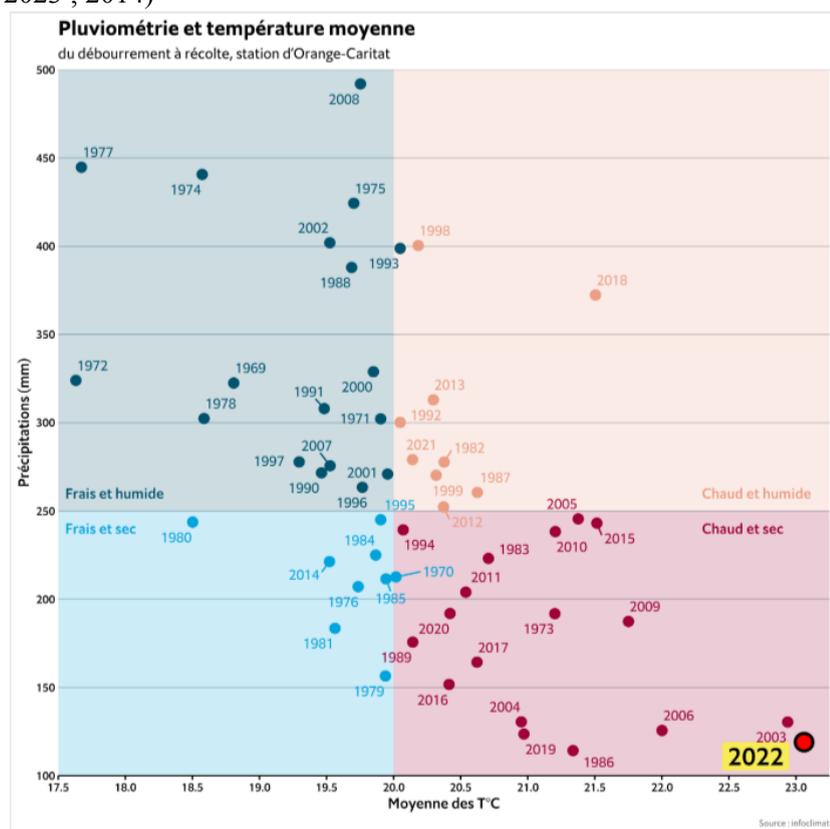


Figure 11 : Ce graphique illustre pour chacune des années comprises entre 1969 et 2022 la température moyenne annuelle et la pluviométrie. Ces données correspondent à la ville d'Orange du débourrement à la récolte du raisin. Source : Infoclimat (données), Institut Rhodanien (graphique)

Le faible cumul des précipitations a lourdement affecté plusieurs communes de la vallée du Rhône en 2022. Nous constatons sur ce graphique, figure 12, que 2022 est l'année où il a le moins plu sur les 8 premiers mois de l'année (entre 2018 et 2022).

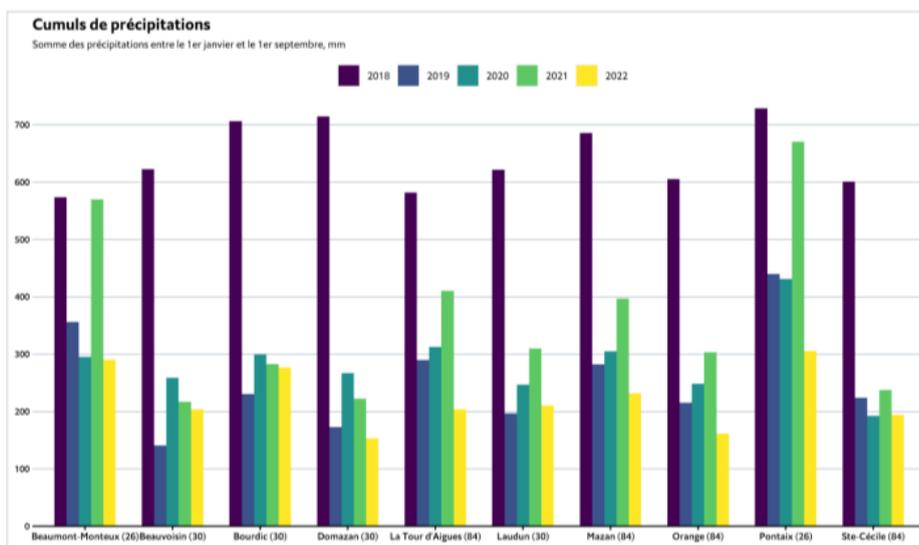


Figure 12 : Cumuls des précipitations observées sur diverses communes entre 2018 et 2022 (du 1er janvier au 1er septembre) Source : Institut Rhodanien

Mais c'est en termes de forte chaleur que l'année 2022 bat ou seconde les records.

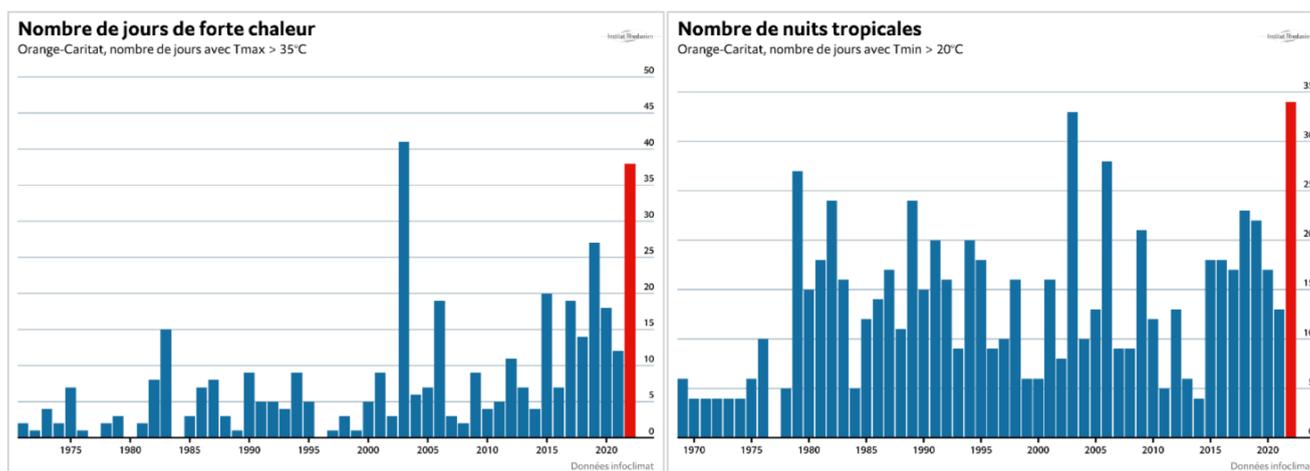


Figure 13 : Nombre de jours avec une forte chaleur (Tmax >35°) observé à Orange.
Source : Institut Rhodanien

Figure 14 : Nombre de jours avec une température minimale >20° observée à Orange.
Source : Institut Rhodanien

L'ensemble de ces données illustrées, (Figure 13 et 14) montre que l'année 2022 a été à Orange une année éprouvante, notamment pour les cultures. Avec le dérèglement climatique, les experts prédisent une généralisation de ces années aux étés chauds et secs (GIEC). A Avignon, par exemple, le climat pourrait être en 2050 celui actuellement à Naples et en 2100 celui de Reggio de Calabre (extrême sud de l'Italie). (Annexe 2)

Avec la limite de temps et de page imposées pour réaliser ce rapport, c'est l'année 2022 qui sera principalement analysée, mais quelques comparaisons annuelles seront effectuées. 2022 a été caractérisée par une extrême chaleur, phénomène qui, selon les chercheurs (GIEC, 2023 ; 2014), tendra à se généraliser dans les futures années à cause du changement climatique, ce qui justifie l'importance de comprendre les réactions des espèces soumis au condition de cette année. (Divers données, graphique et projection climatique sont présenté en Annexe 2 et 8)

L'intensité des facteurs climatiques observés en 2022, sera alors plus fréquente dans les années à venir. Les réactions physiologiques visibles durant cette année sont donc des réactions susceptibles de se normaliser dans les prochaines décennies. Nous pouvons alors nous demander si les végétaux observés dans ce rapport pourront garder leur plasticité physiologique face à la «normalisation» d'année exceptionnellement chaude et sèche comme l'année 2022.

II Cadre théorique : enjeux du stage dans le domaine de l'arboriculture et de la viticulture :

Enjeux climatique spécifiques de l'arboriculture et de la viticulture :

Les enjeux spécifiques de l'arboriculture et de la viticulture en lien avec le climat revêtent une importance primordiale dans le contexte géographique actuel. Ces secteurs agricoles sont profondément influencés par les conditions climatiques, lesquelles peuvent avoir des répercussions significatives sur la physiologie, la croissance et la productivité des cultures. (YAACOUBI. E et al., 2014)

Les variations climatiques, telles que les fluctuations de température, les événements de gel, les périodes de sécheresse prolongées ou les précipitations excessives, peuvent entraîner des déséquilibres dans les processus biologiques des végétaux, la propagation des maladies et des ravageurs (voir partie résultats), ainsi que la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol. Ces changements climatiques peuvent compromettre la durabilité et la rentabilité des exploitations agricoles, mettant en péril la sécurité alimentaire et l'économie régionale (GIEC ; Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires).

Dans un contexte de changement climatique global, il est impératif de comprendre et d'anticiper les effets des conditions climatiques sur l'arboriculture et la viticulture. Les producteurs doivent adapter leurs stratégies de gestion afin de faire face aux fluctuations climatiques, préservant ainsi la santé des cultures et garantissant des rendements optimaux. Comme il sera développé dans ce rapport, cela passera par un ajustement des calendriers de récolte, d'irrigation pour faire face aux variations de température. Le débourrement et la floraison plus précoce du fait du changement climatique (chambre d'agriculture Pays de la Loire) sera déterminant dans les nouvelles organisations agricoles. Sélectionner des variétés résilientes aux contraintes climatiques et mettre en œuvre des techniques culturales plus adaptées aux nouveaux régimes climatiques sont autant de pistes d'adaptation possibles.

Un des enjeux majeurs réside dans l'équilibre entre les demandes hydriques des cultures et la disponibilité de la ressource en eau, notamment dans les régions où cette dernière est limitée. L'optimisation de l'irrigation joue donc un rôle crucial pour assurer une utilisation efficiente de l'eau, réduire les pertes et préserver la qualité des productions (COLAS-BELCOUR. F et al., 2015). Les avancées technologiques, comme l'utilisation de capteurs (tel que l'outil Pepista), de sondes (tensiométrique ou de mesure de température) permettant de mesurer les besoins en eau des plantes, permettent une évaluation plus précise des besoins hydriques des cultures et une gestion plus adéquate de l'irrigation, favorisant ainsi une utilisation durable de la ressource en eau et une optimisation des rendements.

La prise en compte des enjeux climatiques dans l'arboriculture et la viticulture est essentielle pour garantir la durabilité de ces activités agricoles à long terme. Les producteurs doivent s'adapter aux changements climatiques en mettant en place des stratégies de gestion durable, favorisant ainsi la résilience des cultures face aux aléas climatiques et réduisant leur empreinte environnementale. Une meilleure compréhension des interactions entre le climat, les pratiques agricoles et les performances des cultures est importante pour assurer la pérennité de ces filières et contribuer à la transition vers une agriculture plus résiliente et respectueuse de l'environnement (LEGAVE. J.M, 2009)

Par conséquent, il est essentiel de développer des approches adaptées aux spécificités climatiques régionales, en prenant en compte les particularités des territoires et les contraintes environnementales. Cela peut impliquer la mise en place de dispositifs de surveillance climatique, la promotion de techniques de gestion intégrée des cultures, l'adoption de pratiques d'agroforesterie ou encore l'encouragement à la diversification des cultures.

État de l'art des méthodes de suivi de la physiologie dans le secteur de l'arboriculture et de la viticulture impliqué (notamment via l'outil PEPISTA) pour comprendre l'impact des conditions climatiques sur ces cultures :

Les méthodes de suivi dans le secteur de l'arboriculture et de la viticulture peuvent contribuer à appréhender l'impact des conditions climatiques sur ces cultures. Ces méthodes de suivi fournissent des données sur les réponses des plantes face aux variations climatiques, pouvant donner lieu à une compréhension des processus biologiques et physiologiques qui régissent leur croissance et leur développement.

Le fonctionnement de l'outil pepista :

Le Pepista, développé par les chercheurs de l'INRAE d'Avignon conjointement avec le LAMA (Laboratoire d'Automatisme et de Micro-informatique Appliqués) dans les années 80, est un outil de mesure non-destructif des tissus végétaux, utilisé pour évaluer les micro-variations de diamètre des rameaux ou des fruits de manière continue. (GARNIER. E et al., 1985 ; HUGUET J.G, 1985 ; VANNIERE. H, 1992) avec une prise de mesure par heure. En effet, au cours de la journée, le diamètre des rameaux ou des fruits diminue en raison de la transpiration des plantes, puis retrouve sa taille initiale pendant la nuit. Cependant, si le diamètre ne revient pas à sa taille initiale, cela indique un potentiel futur stress (HUGUET J.G, 1985, 1990 ; VANNIERE. H, 1992).

En effet, les micro-variations de diamètre observées chez les arbres sont principalement dues à deux mécanismes : la transpiration et la croissance (secondaire).

La transpiration est le processus par lequel l'eau est évaporée à partir des feuilles des plantes. Lorsque les stomates des feuilles s'ouvrent pour permettre l'échange gazeux nécessaire à la photosynthèse, de l'eau s'évapore. (LENNE. C, 2014 ; 2021) Cette perte d'eau crée une tension dans les vaisseaux conducteurs de l'arbre, ce qui entraîne une diminution du diamètre de l'axe.

Ces variations de diamètre peuvent fournir des informations importantes sur l'état hydrique de l'arbre. Lorsque les conditions sont favorables et que l'arbre dispose d'une quantité suffisante d'eau, le diamètre de l'axe revient à sa taille initiale pendant la nuit, indiquant une récupération adéquate ou une croissance. Cependant, en cas de stress hydrique, le diamètre ne retrouve pas sa taille initiale, ce qui témoigne de l'incapacité de l'arbre à compenser la perte d'eau et indique un besoin accru en irrigation.

En utilisant le Pepista, il est possible de détecter ces variations de diamètre et d'identifier les périodes de stress auxquelles la plante est exposée (HUGUET J.G, 1985, 1990). Cette information est cruciale pour adapter les durées et les pratiques d'irrigation. *«En surveillant les micro-variations de diamètre, il est possible de fournir aux agriculteurs des données précises sur les besoins hydriques des plantes, leur permettant ainsi d'ajuster les quantités d'eau fournies en fonction de ces variations.»* (Agroressources). Il est important de garder à l'esprit que l'ensemble des cultures n'ont pas les mêmes

besoins hydriques (DOORENBOS. J, 1980), en témoignent les graphiques qui suivent illustrés grâce aux données de la chambre d'agriculture de la région Provence Alpes-Côte d'Azur. La figure 15 illustre les irrigations apportées pour pallier un manque de précipitation. Précipitation visible et issue d'une moyenne réalisée par cette même chambre d'agriculture.

Précipitation + irrigation nécessaire par espèce et par mois

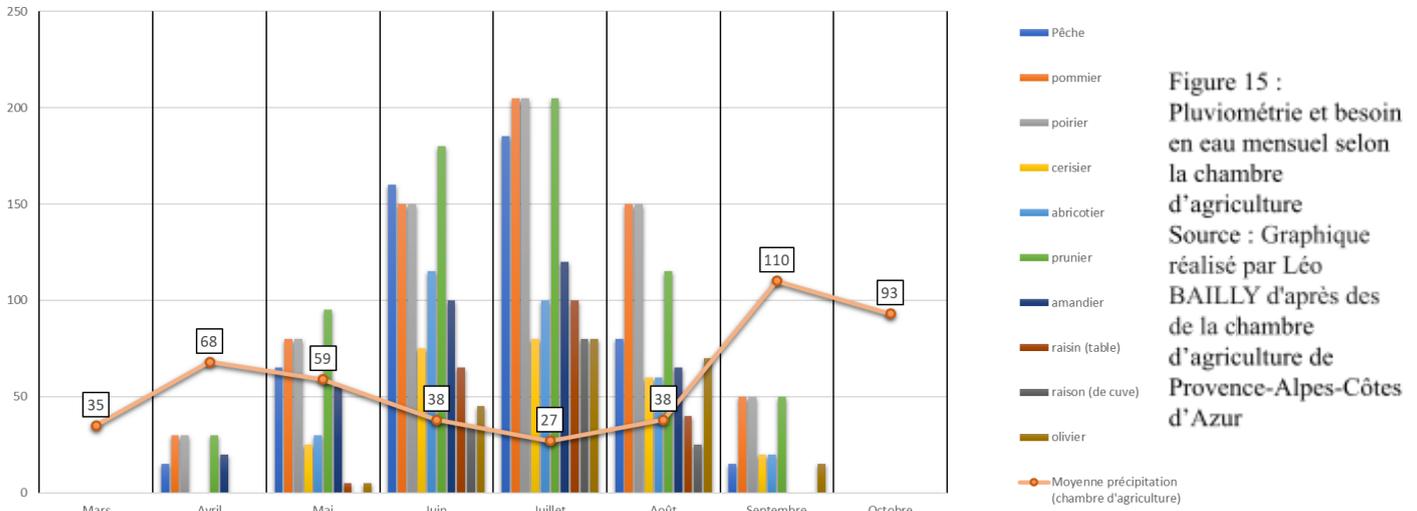


Figure 15 : Pluviométrie et besoin en eau mensuel selon la chambre d'agriculture
Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données de la chambre d'agriculture de Provence-Alpes-Côtes d'Azur

Les chiffres présentés ici correspondent selon la chambre d'agriculture à une "année sèche". Elle fournit ces recommandations concernant les doses d'irrigation calculées en mm, à apporter pour des cultures fruitières sur Avignon. Ces données correspondent à une Réserve Utile (RU) égale à 100mm/m. (Nous ne traiterons pas ici de la question de l'impact d'un sol enherbé ou non). La courbe présente les précipitations annuelles moyennes calculées par la chambre d'agriculture. Les colonnes illustrent les apports conseillés en mm. Le tableau relatant les chiffres illustrés ici est présent en annexe 3.

Le graphique qui suit illustre le cumul de précipitation annuelle et les irrigations conseillées par la chambre d'agriculture. Le prunier, pommier et poirier apparaissent comme les trois espèces les plus consommatrices d'eau avec environ 1340mm/an. En revanche, les raisins à cuve (808mm/an), de table (878mm/an) ainsi que l'olivier (883mm/an) figurent comme étant les espèces les moins consommatrices d'eau (Figure 16). L'ensemble de ces données montre l'importance d'adapter les irrigations selon les cultures

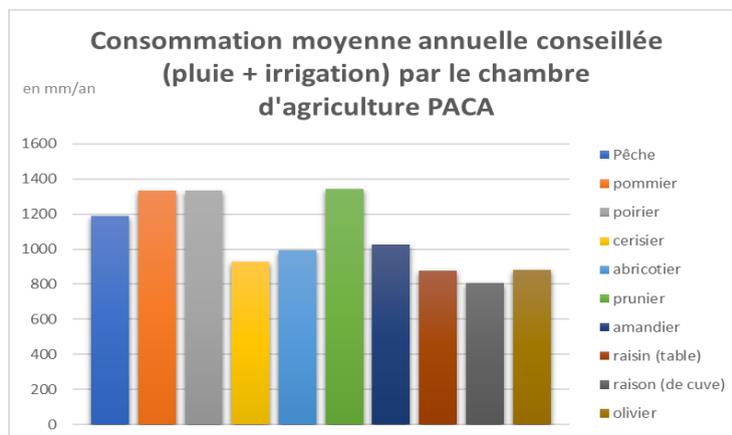


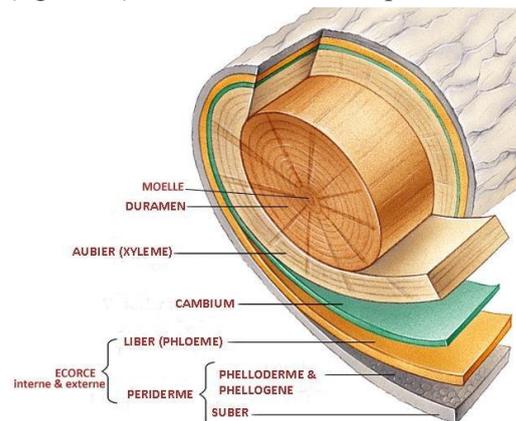
Figure 16 : Besoin moyen annuel exprimé en mm d'eau par espèce. D'après les données de la chambre d'agriculture
Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données de la chambre d'agriculture de Provence-Alpes-Côte d'Azur

Bien que le Pepista permette un meilleur contrôle des irrigations grâce à l'évolution du diamètre de l'axe observé, il est capital de noter que la croissance en longueur et la croissance en épaisseur sont deux aspects distincts du développement des plantes. (LENNE. C, 2014 ; 2021)

La croissance en longueur, également appelée croissance en hauteur ou croissance primaire, fait référence à l'augmentation de la taille linéaire des tiges, des racines et des organes végétaux. Elle est principalement due à la division cellulaire dans les régions apicales des tiges et des racines, ce qui entraîne une augmentation de leur longueur. La croissance en longueur permet aux plantes d'atteindre leur taille adulte et de s'étendre dans leur environnement.

En revanche, la croissance en épaisseur, également connue sous le nom de croissance secondaire, concerne l'augmentation de l'épaisseur des organes végétaux, tels que les tiges, les racines et les troncs. Elle est principalement due à l'activité du cambium (figure 17), un méristème latéral situé entre le bois et l'écorce. Le cambium produit de nouvelles cellules vasculaires vers l'intérieur (xylème) et vers l'extérieur (phloème) (figure 13), entraînant ainsi un épaississement de la plante au fil du temps. (LENNE. C, 2014 ; 2021)

Figure 17 : Observation de la structure d'un tronc d'arbre.
Source : ROIGNANT.J 2018



Ces deux mécanismes sont à prendre en compte. Comprendre cette différence est crucial pour une évaluation précise de la croissance des plantes et une meilleure compréhension de l'influence des facteurs environnementaux sur leur développement. Toutefois, dans ce stage il sera question de l'étude de la variation en épaisseur et non de la croissance en longueur (non visible avec l'outil Pepista).

Parallèlement au Pepista, d'autres outils de mesure peuvent être utilisés en arboriculture et en viticulture pour piloter l'irrigation et étudier l'impact des conditions climatiques sur l'état hydrique des cultures. Parmi celles-ci, on peut citer l'utilisation de sondes d'humidité du sol, de capteurs météorologiques permettant d'enregistrer les données climatiques spécifiques à chaque exploitation, ainsi que des techniques d'imagerie satellite et aérienne permettant de cartographier et de surveiller l'état des cultures à une échelle plus large.

Concernant l'étude de la physiologie de la plante, il existe plusieurs autres outils que le Pepista, notamment ceux qui sont plus spécifiquement liés à la régulation de l'eau et aux échanges gazeux. Voici quelques-uns de ces outils suivi de leur définition :

Ces outils et méthode fournissent des informations spécifiques sur les processus physiologiques liés à la régulation de l'eau, aux échanges gazeux et à la croissance des plantes. Ils sont utilisés dans la recherche et l'observation sur le terrain pour mieux comprendre la physiologie des plantes et leurs réponses aux stimuli environnementaux.

Le tableau 1 qui suit présente : un outil ou une méthode avec une définition, un avantage et un inconvénient, il n'a pas pour vocation de donner un ordre de préférence dans le fonctionnement ou dans l'utilisation.

Outil	Définition	Avantages	Inconvénients
Chambre à pression (COCHARD. H et al., 2001 ; BOUTHIER et al., 2022)	Les chambres à pression, telles que la chambre de Scholander, sont utilisées pour mesurer la conductance hydraulique des plantes. Elles permettent de déterminer la résistance à la circulation de l'eau dans les tissus et les vaisseaux, ce qui donne des informations sur l'efficacité du transport de l'eau dans la plante.	- Permet la mesure précise de la conductance hydraulique des plantes, révélant l'efficacité du transport de l'eau	- Requier une préparation minutieuse de l'échantillon et peut causer des perturbations physiologiques. Il s'agit d'une mesure à un instant t.
Fluorimètre de chlorophylle (DREYER. E et EPRON. D 1991)	Les fluorimètres de chlorophylle mesurent la fluorescence de la chlorophylle dans les feuilles, ce qui permet d'évaluer l'efficacité de la photosynthèse et le fonctionnement des complexes protéiques associés à la photosynthèse. Cela donne des indications sur l'état de santé et l'activité photosynthétique des plantes.	- Permet l'évaluation de l'efficacité de la photosynthèse et le fonctionnement des complexes protéiques associés	- Requier une préparation des échantillons et une expertise dans l'interprétation des données
Pincettes à photosynthèse (ROUSSELIN. A et al., 2017; ROUSSELIN. A, 2016)	Les pincettes à photosynthèse, mesurent les taux de photosynthèse des plantes en capturant la lumière absorbée et la quantité de dioxyde de carbone (CO ₂) échangée par les stomates. Cela permet d'évaluer l'efficacité de la photosynthèse et la réponse des plantes aux variations des conditions environnementales.	- Fournit une mesure directe des taux de photosynthèse et des échanges de CO ₂	- Nécessite une calibration précise, peut être influencé par des facteurs externes tels que la lumière ou la température
Dendromètre (dont le PEPISTA) (HUGUET. J.G, 1985 ; VANNIERE. H, 1992 ; BOUTHIER et al., 2022)	Les dendromètres sont des instruments de mesure utilisés pour évaluer la croissance en diamètre des troncs d'arbres ou des tiges de plantes. Ils permettent de suivre les variations quotidiennes ou saisonnières de la croissance en diamètre, ce qui est utile pour étudier les réponses des plantes aux conditions environnementales.	- Mesure les micro-variations de diamètre des rameaux ou des fruits, permettant de détecter les stress végétaux	- Nécessite une installation spécifique, limite la mesure à l'épaisseur, nécessite une interprétation spécifique des données,
Mesure de flux de sève (CABIBEL. B et HOROYAN. J, 1991 ; BOUTHIER et al., 2022)	La mesure du flux de sève consiste à évaluer le mouvement de la sève à travers les vaisseaux conducteurs des plantes. Cela peut être réalisé à l'aide de techniques telles que les méthodes thermiques ou les méthodes basées sur la variation de la pression. Ces mesures fournissent des informations sur le transport de l'eau et des nutriments dans les plantes.	- Fournit des informations sur le transport de l'eau et des nutriments dans les plantes	- Requier une installation et une maintenance spécifiques, peut être influencé par des facteurs externes
Poromètre (BOUTHIER et al., 2022 ; VIALET-CHABRAND. S, 2013)	Un poromètre est un instrument utilisé pour mesurer la transpiration végétale et la conductance stomatique des feuilles en enregistrant le temps nécessaire pour atteindre un certain point d'humidité.	- Mesure directe de la transpiration végétale.	- Nécessite des étalonnages fréquents, sensibilité aux variations de température et

			matériel coûteux
Suivi des apex (V. BECART, Institut Rhodanien)	La méthode de suivi des apex consiste à observer sur une période donnée l'extrémité de la tige, appelée apex. Suivant la catégorisation de cet apex, différents états de la culture peuvent être estimés.	- Permet l'observation et l'analyse rapide, simple, et gratuite des changements dans la phénologie et la croissance des plantes	- Etude approximative d'observation.
Prise de mesure manuelle	Cela consiste à effectuer des mesures manuelles, telles que la mesure de la hauteur, de la largeur des feuilles, du nombre de fleurs, ou de tout autre paramètre spécifique à l'étude en cours. Ces mesures permettent de caractériser la croissance, le développement et la performance des plantes.	- Permet la caractérisation directe de divers paramètres de croissance et de performance des plantes	- Peut être chronophage, dépend de l'expertise de l'opérateur, peut être sujet à des erreurs de mesure

Tableau 1 : Définition, avantage et inconvénient des outils permettant l'étude de la physiologie végétale
Source : Réalisé par BAILLY Léo ; D'après les sources citées dans le tableau

III Cadre méthodologique: démarche méthodologique du stage

L'outil Pepista

Le système Pepista, breveté par l'INRA, fonctionne en reliant divers capteurs (1 à 4) au boîtier (appelé Pepista). Agroressources en utilise en général 2 capteurs afin de suivre 2 branches ou deux arbres distincts. Est ensuite utilisé le logiciel "PepistaPlus" afin d'importer les données afin qu'elles soient traitées sur excel. L'ensemble des boîtiers ne permet pas la transmission des données, les données sont alors exportées sur le terrain, il s'agit alors de boîtier enregistreur et non de boîtier transmetteur. L'exportation sur place peut également être effectuée dans le cas de défauts dans la transmission.

Les capteurs sont constitués d'une bobine fixée sur un porte-capteur en INVAR (un alliage Fer Nickel à coefficient de dilatation pratiquement nul). Ce porte-capteur est fixé à l'organe mesuré, généralement à une branche, un tronc (de faible diamètre) ou encore un fruit. Une aiguille en fer doux, en contact direct avec l'organe observé, se déplace à l'intérieur de l'axe creux de la bobine lors d'infime modification du diamètre (1/100mm) de l'organe observé (Figure 18-19-20). La donnée correspondante est enregistrée dans un module d'acquisition de données qu'on appelle maintenant "Boîtier Pepista". (HUGUET. J.G, 1985).

Le schéma du porte capteur Pepista visible ci contre est l'outil tel qu'il a été breveté par l'INRA. (HUGUET. J.G, 1985)

L'entreprise Agroressources utilise des versions légèrement différentes (ces portes capteurs sont présents ci dessous en figure 19) afin d'augmenter leur facilité d'installation (porte capteur installé figure 20).

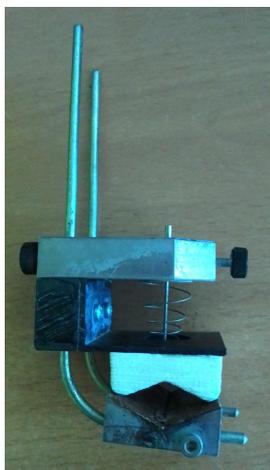


Figure 19 : Porte capteur utilisé par l'entreprise
Source : Léo BAILLY

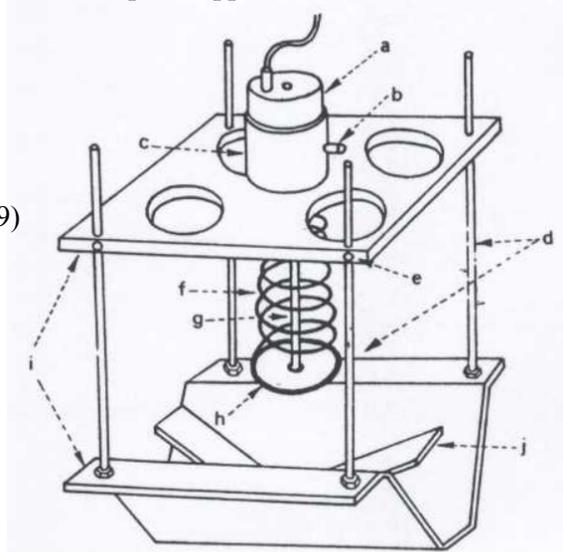


Figure 18 : - Schéma d'un porte-capteur système PEPISTA.
a - capteur de déplacement
b - visserie pour la fixation du capteur
c - cylindre guide pour le capteur
d - tige INVAR
e - visserie pour la fixation de la tige INVAR
f - ressort de stabilisation
g - tige sensible
h - anneau plastique
i - stabilisateurs
j - stabilisateur supplémentaire en forme de V.

Figure 20 : Porte capteur installé sur vigne
Source : Léo Bailly

Les variations de dimensions du tronc, d'une charpentière, ou d'un fruit, sont liées aux fluctuations du statut hydrique de la plante tout au long de la journée. Ces variations ont été signalées depuis de nombreuses années (BARTHOLOMEW. E.T, 1929 ; HALMA. F.F, 1934). Le suivi micromorphométrique en temps réel de ces organes nous permet de mieux visualiser ces phénomènes.

Sous l'effet du rayonnement solaire, les stomates s'ouvrent en début de matinée et la plante perd de l'eau par transpiration. Le flux hydrique n'est pas conservatif, c'est-à-dire que la plante perd momentanément plus d'eau qu'elle n'en absorbe par ses racines, ce qui entraîne une contraction. On parle alors d'une sollicitation des "réservoirs internes" de végétaux (KATERJI, 1982). Ce déséquilibre persiste jusqu'au milieu de l'après-midi lors d'une journée normalement ensoleillée. En fin d'après-midi et pendant la nuit, la plante reconstitue ses réserves hydriques et peut exprimer son potentiel de croissance si la disponibilité en eau du sol est satisfaisante.

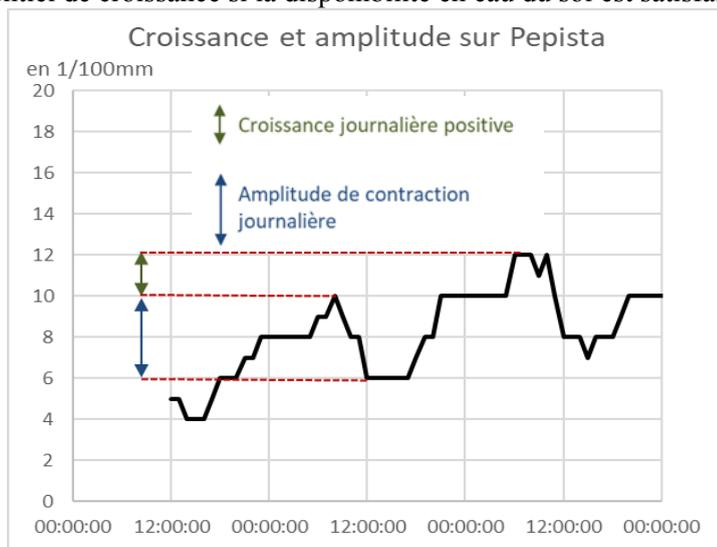


Figure 21 : Interprétation des deux grands principes de l'observation d'un courbe Pepista.
Source : Graphique réalisé par Léo Bailly d'après Agroressources

Deux critères sont utilisés pour caractériser une journée (Figure 21) :

- La croissance journalière positive, correspond à la différences relevés entre 2 mesures prises à 24h d'intervalle, il convient de prendre les valeurs maximales.
- L'amplitude de contraction journalière, il s'agit de la différence entre la mesure maximale prise en début de matinée et la mesure minimale prise en début d'après-midi le même jour. (VANNIERE. H, 1992)

L'observation de la variabilité des mesures micromorphométriques met en évidence plusieurs aspects. Tout d'abord, il existe une variabilité temporelle des critères de croissance et d'amplitude sur une longue période d'enregistrement.

Lors de l'observation de la croissance saisonnière, on observe sur pommier une tendance linéaire pendant la première phase, qui ralentit durant l'été pour atteindre un plateau en automne et au début de l'hiver (Figure 22). Les amplitudes de contraction connaissent également une variabilité liée à la contrainte hydrique résultant de la demande climatique et de la disponibilité en eau du sol. Elles atteignent en général des valeurs moyennes maximales en juillet et août (VANNIERE. H, 1992 sur clémentinier). Mais comme nous l'avons dit précédemment ces observations peuvent être faites sur diverses espèces et sur un laps de temps différent.

Les deux prochaines pages illustrent le procédé de traitement effectué par l'entreprise de la collecte des données jusqu'à leur illustration. Deux échelles temporelle sont utilisées (saison, mois)

La figure 22 est une courbe relatant la croissance annuelle (pour 2022) d'un pommier de la variété Rosy Glow.

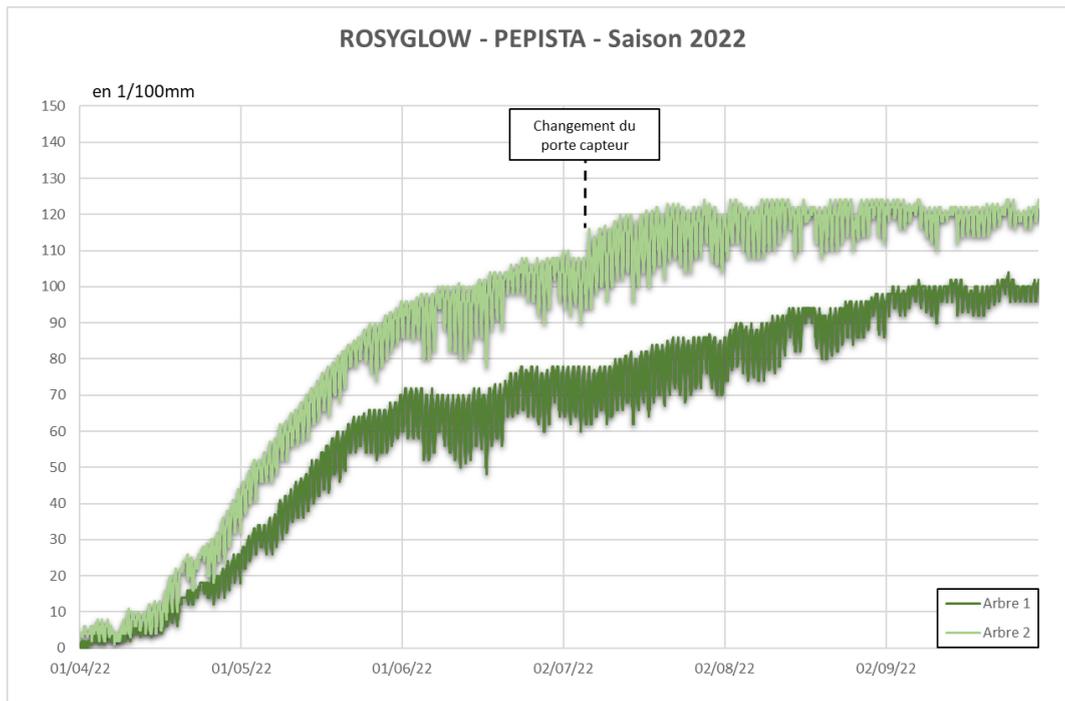


Figure 22 :
 Visualisation des données Pepista sur l'ensemble de la saison 2022.
 Source : Graphique réalisé par Léo Bailly d'après des données Agroressources

Le graphique figure 22 est organisé de façon à avoir sur l'axe des abscisses les dates sous la forme jour/mois/année et en ordonné figure l'axe relatif au grossissement observé. Celui-ci est exprimé en centième de mm (soit 1/100mm). Ces courbes sont le résultat de l'importation dans Excel des données Pepista transmises ou récupérées par Agroressources. C'est le logiciel «PepistaPlus» qui est utilisé afin de récupérer les données issues des boitiers transmetteurs. Deux courbes sont présentées sur ce graphique, elles sont légendées «Arbre 1» et «Arbre 2». Chaque courbe correspond aux variations observées par un capteur relié au Pepista. Avoir plusieurs courbes d'observation permet en cas d'aléas techniques de conserver une capacité d'observation. On constate sur ce graphique qu'un changement de porte capteur peut apporter des modifications aux mesures observées (fait du repositionnement et du recalibrage jamais identique) ce qui montre la aussi l'importance d'avoir plusieurs sources de données.

De plus, chaque individu ne réagit pas de la même façon aux conditions climatiques. Il est important de souligner que ces deux pommiers se situent à quelque mètre l'un de l'autre, ce n'est donc pas une situation géographique différente qui permet de justifier la variable de croissance observée ici. Il y a donc une variabilité au niveau de l'individu pouvant s'expliquer par la charge en fruit, la vigueur, mais quelquefois cela peut être plus difficile à comprendre.

Les différentes étapes de croissance évoquées en 1992 par VANNIERE. H sont bien visibles sur ces courbes. En effet, nous distinguons une croissance franche (70 à 95 centième de mm soit 0.7 et 0.95mm) entre le début avril et la fin mai, suivi d'une relative stabilité durant juin/juillet (avec une croissance d'environ 0.20 mm pour chacun des axes (il faut garder à l'esprit qu'un changement de porte capteur a modifié la courbe de l'arbre 2). La dynamique observable durant les deux derniers mois du graphique (août/septembre) varie. L'arbre 1 croît d'environ 0.15 mm alors que la croissance s'arrête pour l'arbre 2 (Figure 22).

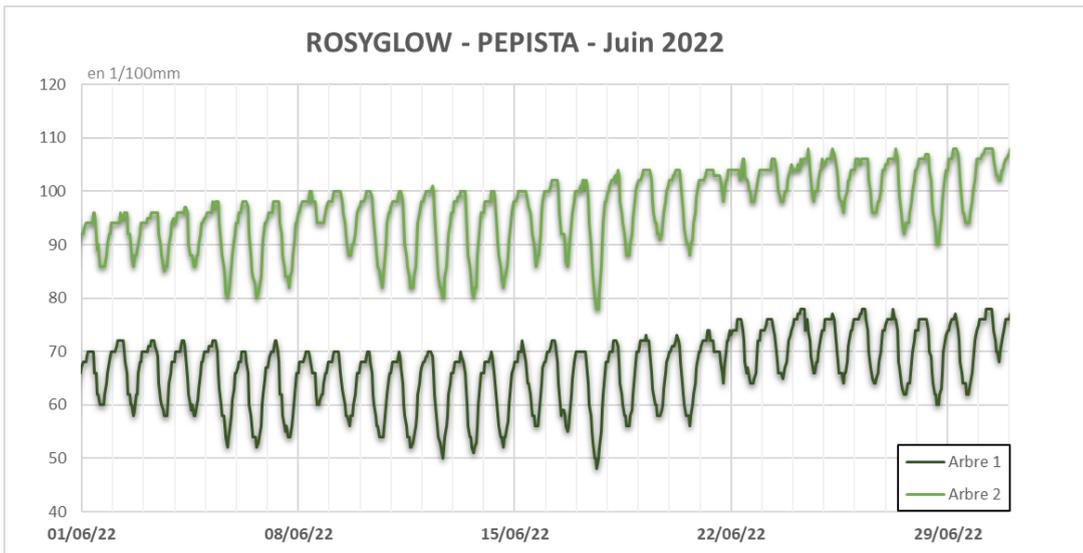


Figure 23 : Visualisation des données Pepista sur un mois de la saison 2022. (Rosy Glow est une variété de pommier)
Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Aggroressources

Le graphique présenté ci-dessus en figure 23 illustre avec une nouvelle échelle temporelle (mensuelle) les variations micromorphométriques observables pour le mois de juin sur pommier. Il illustre la différence d'amplitude entre diverses journées.

La courbe qui suit relate l'observation d'une vigne du 15 juin au 14 juillet 2022 inclus. Les annotations visibles sur ce graphique sont les observations climatiques observées lors de la réalisation du conseil en irrigation (Figure 24). Le conseil en tant que tel ne sera pas traité dans ce rapport.

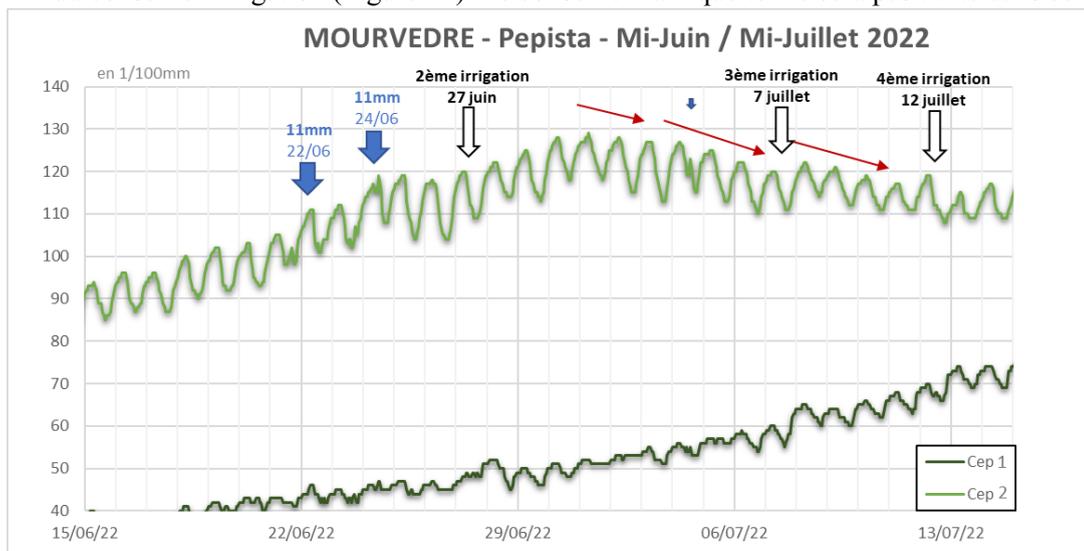


Figure 24 : Visualisation des données Pepista du 15/06 au 14/07 de la saison 2022. (Mourvèdre est une variété de vigne)
Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Aggroressources

Les flèches en bleu (Figure 24) représentent les pluies enregistrées par la station météo du client. Les flèches blanches aux contours noirs illustrent les irrigations effectuées sur la parcelle. Les flèches rouges indiquent les stress, caractérisés par au minimum 2 jours consécutifs de diminution de diamètre. A la lumière de ces informations, on constate que le comportement des 2 ceps suivis est très différent. En effet on constate une dynamique de croissance avec des amplitudes modérées sur le cep 1, alors que le cep 2 fait des amplitudes fortes et montre des signes de stress hydrique (flèche rouge).

On constate des variations qu'il s'agisse de la croissance annuelle, de l'amplitude journalière et/ou de réaction face à un facteur climatique entre les deux ceps, qui sont pourtant à quelques mètres de distance. Nous pouvons donc nous demander : Quelles sont les réactions des différentes espèces face aux conditions climatiques ; réagissent-elles de la même façon ; certaines sont-elles plus adaptées

au climat méditerranéen ; si oui lesquelles et pourquoi ; et comment les outils dont dispose Agroressources peuvent nous permettre de les observer ? En d'autres termes : "Comment l'utilisation de la technologie (via l'outil PEPISTA) peut-elle nous permettre de mieux comprendre l'impact des conditions climatiques dans l'arboriculture et la viticulture ?".

D'autres outils que le Pepista ont été utilisés lors de cette étude, en voici une description :

- **Les sondes tensiométrique et l'outil Monitor**

Le Monitor est un instrument utilisé dans le domaine agricole, il permet d'évaluer la tension exercée par les racines afin que l'eau soit absorbée par ces dernières, ce phénomène est aussi appelé "le potentiel hydrique du sol" ou encore "la succion". Ce potentiel hydrique représente la tension exercée par l'eau présente dans le sol, jouant ainsi un rôle crucial dans la disponibilité en eau pour les cultures. Le Monitor permet donc d'effectuer un suivi continu de l'humidité du sol, ce qui ouvre la voie à une optimisation efficace des pratiques d'irrigation.

Le Monitor est connecté à des sondes tensiométriques. Ces sondes sont généralement fabriquées à partir de matériaux poreux tels que la céramique ou le polymère, elles sont ensuite insérées dans le sol. Le matériau poreux favorise l'infiltration de l'eau du sol, tandis que la tension de l'eau est évaluée grâce à la pression négative résultant de l'extraction de l'eau du matériau poreux (BOUTHIER.A et al., 2022 ; TRON.G 2000). Cette pression négative est ensuite transmise au Monitor, fournissant ainsi une mesure précise de la tension hydrique dans le sol.



Figure 25 : Zone poreuse de la sonde tensiométrique.
Source : Léo BAILLY



Figure 26 : Fil de connexion de la sonde tensiométrique
Source : Léo BAILLY



Figure 27 : Sonde tensiométrique entière
Source : Léo BAILLY

L'outil Monitor, est un dispositif électronique. Il est connecté filairement aux sondes (Figure 25, 26 et 27), enregistrant et affichant les mesures de tension de l'eau dans le sol (Figure 28). Cet outil permet de réaliser des mesures régulières (toutes les 4 heures). Les données une fois collectées peuvent être analysées, fournissant des informations pour déterminer les besoins en irrigation des cultures et ajuster les pratiques d'irrigation en conséquence.

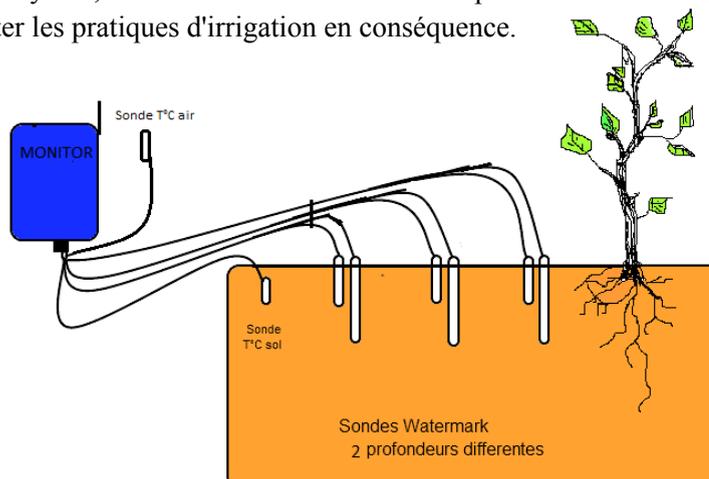


Figure 28 : Schéma relatant la mise en place de l'outil monitor et des sondes tensiométriques.
Source : Agroressources (site internet)



Figure 29 : Boitier Monitor (encadré bleu) et boitier Pepista (encadré vert)
Source : Agrossoresources

Les caractéristiques physiques du sol pouvant faire varier la disponibilité en eau, il est important de noter que les sondes tensiométriques peuvent être installées à différentes profondeurs dans le sol, suivant les caractéristiques des cultures étudiées. Toutefois dans le cadre de ce dossier la profondeur des sondes sur les parcelles étudiées sont de 25 cm et 50 cm (Figure 28). Cette configuration permet de surveiller l'humidité du sol en surface et en profondeur.

Afin de garantir la fiabilité des données, 3 paires de sondes sont disposées sur la parcelle (Figure 28), (Une paire étant composée d'une sonde à 25 cm et l'autre à 50 cm). De ce fait, en cas de dysfonctionnement de certaines sondes il est possible de garder une visibilité sur l'état hydrique de la parcelle observée. Les données sont visibles sur une plateforme web appelé "Challenge". Cette plateforme permet de visualiser les tensions relevées par ce matériel.

La station météo

Afin d'analyser les facteurs climatique influençant la végétation, des données météo seront traitées. Dans la majorité des cas, ces données proviennent des stations, de marque PESSL Instruments® (modèle IMT) vendues ou louées par l'entreprise aux agriculteurs ou aux autres clients.

La station météorologique (Figure 30) est un dispositif utilisé pour collecter et enregistrer des données météorologiques. Les capteurs intégrés à la station effectuent des mesures en temps réel, et les données sont transmises régulièrement par le biais d'une carte SIM intégrée. L'accès aux données est possible grâce à l'interface en ligne Fieldclimate, qui permet de visualiser l'évolution des mesures à l'aide de graphiques sur une période de temps déterminée. De plus, la plateforme web Fieldclimate permet de consulter et remonter à la date d'installation de la station. La plateforme Fieldclimate offre la possibilité d'exporter les données vers des fichiers Excel pour ainsi générer des graphiques.

En ce qui concerne les capteurs, différents types sont disponibles. Le pluviomètre, équipé d'un mécanisme basculant (le nombre de bascule indique la somme en mm des précipitations), la précision est de l'ordre de 0,2 mm avec une précision de 5%. Un capteur hydroclip placé dans un abri ventilé

permet de mesurer à la fois la température avec une résolution de 0,01°C avec une précision de 0,1°C, et l'hygrométrie avec une résolution de 0.02% pour une précision de 0,8%. Enfin, un capteur d'humectation est également disponible, permettant de mesurer la conductivité sur un papier filtre et d'exprimer la durée d'humectation en minutes, avec une résolution de 1 minute. Certaines de ces stations peuvent mesurer la vitesse du vent et l'ensoleillement. La collecte de ces données est horaire tout comme le Pepista ce qui permet une analyse fine.

Dans le cas où le client ne dispose pas de stations météo, l'entreprise accède aux données d'un réseau de stations météo régionales gérées par le CRIAMESUD. Toutefois, il n'y a qu'une donnée par jour, et la station se situe à proximité et non sur la parcelle observée.



Figure 30 : Stations météo installées
Source : Agroressources

Echantillonnage

Le choix de l'échantillonnage est crucial en vue d'obtenir des résultats représentatifs concernant les réactions des différentes essences végétales (olivier, pêcher, vigne, pommier) face aux fluctuations environnementales, en particulier en ce qui concerne le diamètre des axes mesuré au moyen du Pepista.

Le choix d'une parcelle où le dispositif Pepista est implanté était indispensable. Par ailleurs, la sélection d'une parcelle à proximité d'une station météorologique fournissant des données climatiques correspondant au contexte géographique et climatique de la zone d'étude était pour la fiabilité des données un facteur essentiel. L'intégration de données climatiques spécifiques à la parcelle permet ainsi de lier plus précisément les variations observées dans le grossissement des tiges aux conditions environnementales locales.

Enfin, suivant les parcelles qui correspondent c'est avec l'équipe d'Agroressources que le choix final a été effectué afin de travailler sur les parcelles les plus représentatives, en fonction des résultats de production et des mesures Pepista déjà enregistrées. Cela a permis d'éviter la sélection de parcelles ayant subi des aléas techniques durant l'année 2022, qui pourraient fausser les résultats de l'étude. Leur expertise dans la sélection des parcelles a permis d'éliminer les facteurs confondants tels que les lacunes dans les données sur une période prolongée ou la présence de maladies affectant les vergers.

Nous allons maintenant voir comment l'arboriculture et la viticulture ont réagi physiologiquement face à ce climat extrême.

IV- Résultats: présentation et analyse des résultats obtenus

Facteurs climatiques influençant la croissance secondaire :

L'objectif de la partie résultat de ce rapport est d'identifier les facteurs climatique influençant la variabilité de croissance et d'amplitude de la végétation étudiée, par le biais de la bibliographie et des observations faites au sein de l'entreprise. Ce rapport traite de diverses espèces telles que : le pommier, l'olivier, le pêcher et la vigne.

Le contexte climatique de la région méditerranéenne, caractérisée par son climat chaud et sec, influence la végétation est par conséquent l'agriculture de la région. Plusieurs facteurs climatiques influençant la physiologie des plantes seront étudiés dans cette partie. (l'ordre dans lequel ils sont évoqués ne vise pas à la hiérarchisation)

Commençons par la température de l'air et l'ensoleillement qui occupent une place majeure dans le processus de croissance des cultures méditerranéennes. Les étés chauds et ensoleillés favorisent la photosynthèse et la maturation des fruits, tandis que des hivers doux permettent aux plantes de passer par une phase de repos. L'ensoleillement intense fournit une quantité considérable d'énergie solaire, propice à la croissance végétative et à la production de sucres dans les fruits (BUREAU. S, 1998 ; RAZUNGLES. A et al., 2000 ; JUILLION, 2022)

Les précipitations jouent également un rôle capital. La répartition saisonnière des précipitations, avec des hivers plus humides et des étés plus secs, exerce une influence sur la disponibilité en eau pour les plantes. Pour un grand nombre de cultures, l'irrigation vient compléter les précipitations afin de garantir une croissance et un rendement optimal des cultures (WITTLING, C et RUELLE, P, 2022). Toutefois, comme le rappelle RAMBAL. S en 2002 le climat méditerranéen ne permet pas la prévisibilité de la ressource en eau. Le climat méditerranéen est selon lui "le plus imprévisible de la planète", avec environ 30% de variation annuelle (RAMBAL. S, 2002).

Le vent constitue un autre élément clé dans la région méditerranéenne. Les vents méditerranéens se caractérisent par une grande variabilité en termes de direction et d'intensité, ce qui affecte la ventilation des cultures et la transpiration des plantes (TASSIN. C, 2012). Un vent modéré peut favoriser la circulation de l'air, augmenter la production de photosynthèse nette (PERRIER. A, 1978), réduire les risques de maladies fongiques, tandis qu'un vent fort peut entraîner une perte d'humidité de l'air et une détérioration des plantes.

Dans cette partie : résultats, nous examinerons de plus près l'influence des facteurs climatiques que l'on vient d'évoquer sur différentes espèces. Nous analyserons comment la température, l'ensoleillement, les précipitations et le vent impactent les cultures, en examinant quelques-uns de leurs effets sur la croissance (données issues d'Agroressources et de la bibliographie disponible). Il est important de garder à l'esprit que nous analysons l'année 2022 (pour les graphiques réalisés avec les données d'Agroressources), année particulièrement chaude et peu pluvieuse. L'annexe 4 montre les différences de croissance et de rendement observées sur une parcelle de pommier entre diverses années. Celles-ci peuvent être très importantes.

La température de l'air

Il existe une relation complexe entre la température des feuilles et celle de l'air ambiant. Dans certains cas, les feuilles peuvent être légèrement plus fraîches que l'air, en particulier lorsqu'elles transpirent activement. La transpiration par les stomates permet de refroidir les feuilles, car l'évaporation de l'eau entraîne une extraction de chaleur. Cela contribue à maintenir une température foliaire relativement basse malgré une température ambiante élevée. (FRESNEAU, C, 2007)

Cependant, dans des conditions de stress hydrique ou de faible taux de transpiration, les feuilles peuvent présenter des températures supérieures à celles de l'air ambiant (FRESNEAU, C, 2007). Lorsque les plantes sont confrontées à des conditions de sécheresse, elles réduisent leur transpiration pour économiser l'eau, ce qui entraîne une accumulation de chaleur dans les feuilles (SCHOCH. P.G, et al., 1987). Si l'écart de température entre la feuille et l'air devient trop important cela peut endommager les tissus de la feuille. (FRESNEAU, C, 2007)

Toutefois, toute espèce ne réagit pas de la même façon à une température similaire, notamment du fait de la régulation et de la densité stomatique différente entre les espèces (DENDEN et al, 2008) (pouvant varier entre différentes variétés d'une même espèce) (ZAMBONI. M et IACONO. F, 1988). Les stomates, situés au niveau de l'épiderme foliaire, jouent un rôle central dans la régulation des échanges gazeux, tels que la transpiration et l'assimilation du dioxyde de carbone (CO₂) essentiel à la photosynthèse. (DAMOUR. G, 2008)

Certaines plantes, comme celles que l'on dit adaptées aux climats chauds et secs, présentent une capacité accrue à tolérer les températures élevées. Leurs stomates peuvent rester partiellement fermés malgré l'augmentation de la température, ce qui réduit la transpiration et prévient ainsi une perte excessive d'eau (DAMOUR. G, 2008). En revanche, certaines plantes, surtout celles que l'on dit adaptées aux climats plus frais, peuvent se montrer plus sensibles aux températures élevées.

La régulation stomatique permet donc à la plante de maintenir son homéostasie thermique et d'optimiser son fonctionnement physiologique. En ajustant l'ouverture des stomates, les plantes peuvent réguler les flux d'eau transpirée et l'assimilation du CO₂, optimisant ainsi leurs échanges gazeux tout en évitant les risques de déshydratation ou de surchauffe. (SCHOCH. P.G, 1986 ; DAMOUR. G, 2008)

Cette régulation stomatique est aussi étroitement liée à d'autres facteurs environnementaux, tels que l'humidité atmosphérique, la disponibilité en eau du sol et l'intensité lumineuse. L'interaction complexe entre ces paramètres environnementaux détermine la réponse globale des plantes à la température de l'air et leur capacité à s'adapter à des conditions thermiques variables.

Lorsque les températures sont élevées, on observe une augmentation de l'amplitude, comme nous le montre le graphique qui suit. (Figure 31, Dorabelle est une variété de pêche)

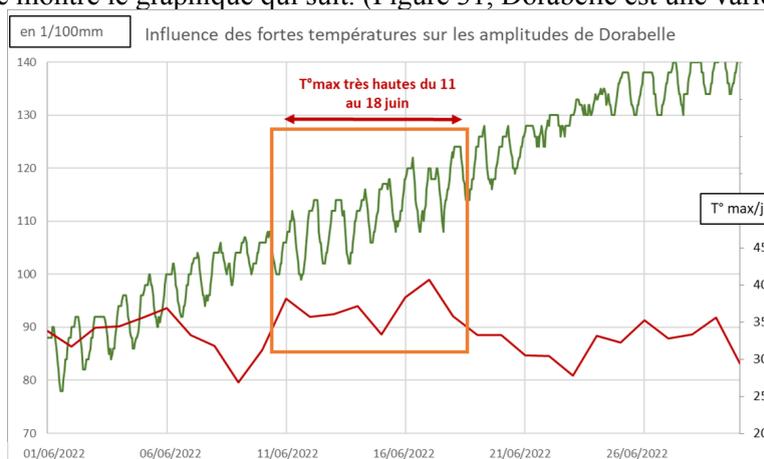


Figure 31 : Visualisation de la hausse des amplitudes aux jours de fortes chaleurs. Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Aggroressources

Toutefois, les fortes chaleurs n'engendrent pas les mêmes amplitudes sur toutes les espèces. Il en est de même pour la variation de diamètre horaire, les graphiques qui suivent illustrent l'existence de ces différences entre espèces durant une période de forte température.

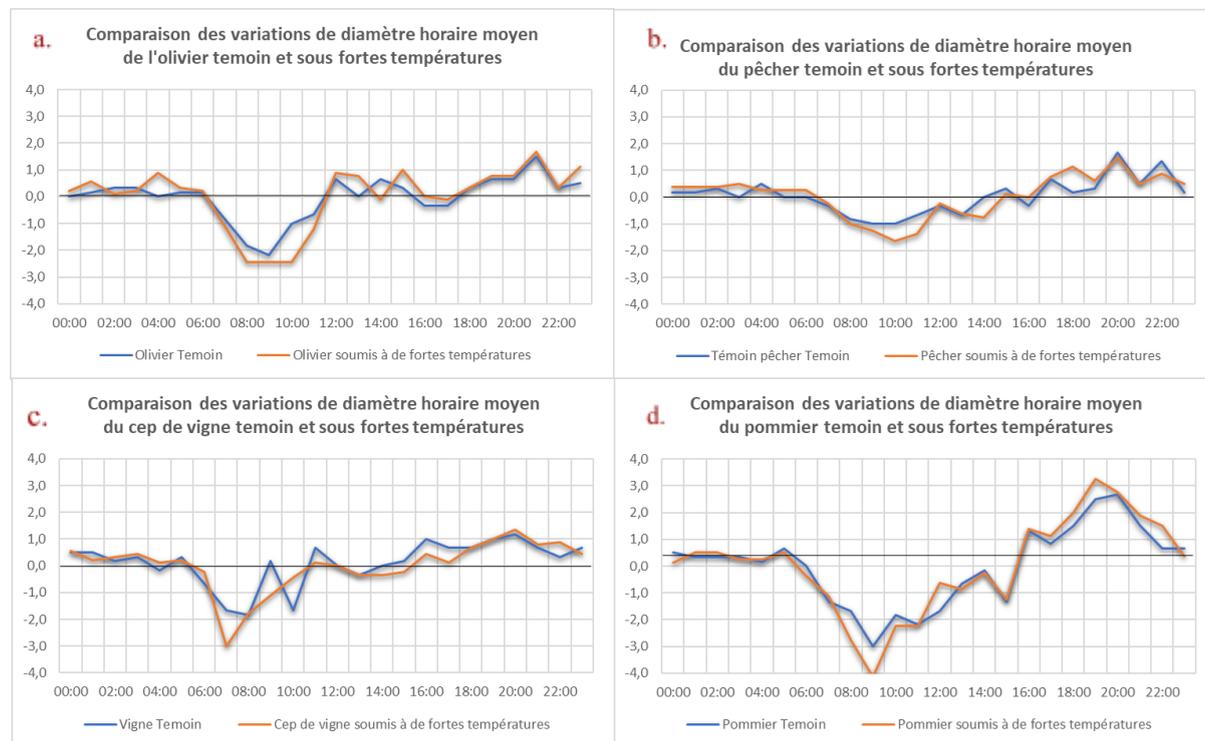


Figure 32 : Différences de grossissement journalières correspondantes à des jours de températures élevés.

Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Agrossources

Les 4 espèces réagissent par une augmentation de la fluctuation de leur variation horaire (exemple la perte de diamètre maximum pour ces 4 végétaux est accru sous forte chaleur). Cependant, la vigne (c - Figure 32) subit une forte perte de diamètre aux premières heures de la journée (plus rapide que pour les autres espèces) pour ensuite se stabiliser entre 10h et 17h. Etant donnée que la vigne fait partie des essences les moins irriguées (Figure 15 page 18), nous pouvons supposer que plus un végétal limite sa perte de diamètre lors d'épisodes de forte chaleur plus ce dernier est adapté à un climat chaud tel que le climat méditerranéen. La justification du choix des périodes étudiées, les mesures climatiques moyennes et parfois maximale et minimale (pour température et humidité de l'air) relevées sur chacune des parcelles ainsi qu'une carte les situant sont présentées en annexe 5

L'ensoleillement

L'ensoleillement se réfère à l'exposition directe des feuilles à la lumière. Son intensité varie en fonction de facteurs géographiques tels que l'altitude, l'orientation des versants et la couverture nuageuse. Ces variations influencent directement la température des feuilles.

Lorsque les feuilles sont exposées à un ensoleillement intense, elles absorbent une quantité importante d'énergie lumineuse. Cette absorption d'énergie conduit à un réchauffement des feuilles, entraînant des températures supérieures à celles de l'air ambiant. Ainsi, dans des conditions d'ensoleillement élevé, les feuilles ont tendance à se réchauffer davantage, la demande hydrique est amplifiée. (DAMOUR. G, 2008)

En revanche, en présence d'un ensoleillement intermittent ou d'une couverture nuageuse (Figure 33), les feuilles évaporent moins d'eau. Le graphique suivant illustre l'influence de

l'ensoleillement sur la transpiration des végétaux. On constate aisément que le végétal transpire davantage en période ensoleillée, il produit alors plus de sucre mais utilise aussi plus d'eau.

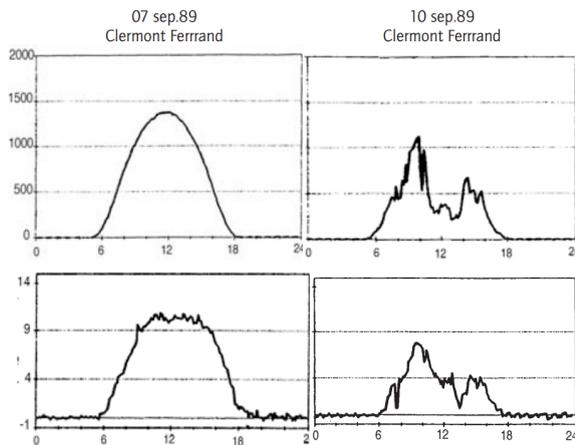


Figure 33 : Illustration de la différence d'ensoleillement sur deux journées; ensoleillé à gauche et nuageuse à droite. En ordonné le rayonnement solaire (en watts/m²), en abscisse le temps. En dessous les grammes d'eau évaporé par min (la transpiration). D'après Daudet 1995
Source : CAUE 77

Pour réguler leur température foliaire en réponse à l'ensoleillement, les végétaux ont développé divers mécanismes. Certaines espèces présentent des adaptations structurales, telles que des formes de feuilles particulières ou une orientation spécifique, afin de réduire l'exposition directe au soleil et limiter ainsi l'absorption excessive de chaleur. De plus, la présence de pigments protecteurs, comme les pigments anthocyanes, peut contribuer à atténuer les effets néfastes de l'ensoleillement intense. (HOPKINS. W.G, 2003)

Toutefois, la phase de transpiration induite par l'ensoleillement ne permet pas la compensation instantanée de la ressource en eau par le biais de l'absorption de l'eau par les racines (figure 34).

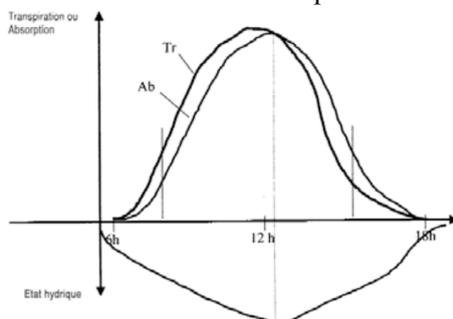


Figure 34 : Schéma de l'évolution de la transpiration (Tr), de l'absorption (Ab) et de l'état hydrique d'un végétal au cours d'une journée ensoleillée
Source : CAUE 77

Ce sont les réserves internes en eau de la plante qui permettent alors la transpiration jusqu'à l'arrivée d'eau absorbée par les racines (HUGUET, 1985 ; SIMMONEAU et al., 1993 ; URBAN et al., 1994). La vitesse de circulation de l'eau dans la plante peut varier suivant l'espèce et le besoin en eau du végétal pour faire face aux conditions climatiques. En général, la vitesse de déplacement de l'eau, sous forme de sève brute, à l'intérieur de la plante est d'environ 1 à 6 mètres par heure. Dans des conditions de transpiration maximale, cette vitesse peut atteindre jusqu'à 100 mètres par heure (HELLER. R, 2020). Cependant, en présence d'une atmosphère saturée en eau, où la transpiration est réduite, la vitesse de déplacement de l'eau diminue. Elle peut aussi être annulée lorsque l'alimentation en eau est bloquée, notamment en cas de sécheresse ou de froid hivernal. (HELLER. R, 2020)

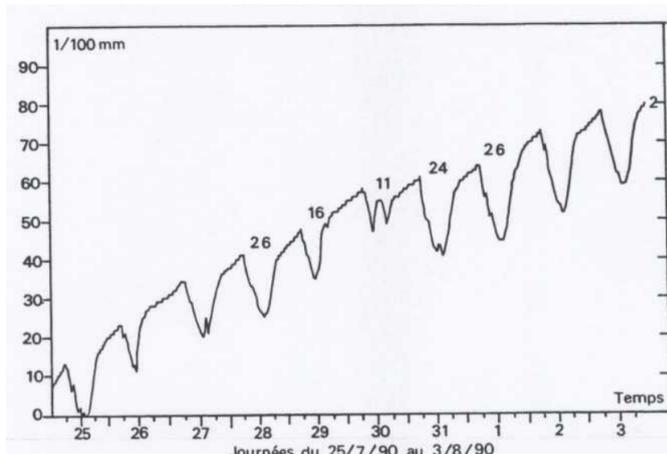


Figure 35 : Effets immédiats d'une chute de rayonnement sur l'amplitude de contraction et conséquences sur la croissance du jour suivant (les chiffres en indice représentent le rayonnement journalier en MJ m⁻²)
Source : H.VANNIERE, 1992 (Pour l'ensemble des graphiques issu de cette source, l'étude est menée avec le Pepista, sur axe de clémentinier. Les nombres en abscisse correspondre à la date du jour à 12h)

On observe sur ce graphique (Figure 35) que la baisse du rayonnement cause une diminution des amplitudes, ce qui signifie une réduction de la transpiration. Dans le cas de ce graphique, nous observons une répétition des jours de faible ensoleillement (du 28 au 31 juillet) engendrant une stagnation de la croissance le 30, 31 et 1er août. Ceci est dû au manque d'assimilats occasionné par le peu de transpiration effectué les jours précédents (VANNIERE. H, 1992). Une fois l'ensoleillement revenu à la normale (à partir du 1er août) le végétal reprend une croissance, similaire aux jours précédant la perturbation. De plus, lorsque l'ensoleillement est minime, comme c'est le cas le 30 juillet avec 11 MJ m⁻², un regonflement temporaire peut être visible au milieu de la journée rendant l'amplitude presque inexistante.

La figure qui suit illustre l'influence de l'ensoleillement sur la photosynthèse (assimilation de CO₂) et la transpiration en faisant le lien avec l'écart température, air et feuille. Dès que le végétal est soumis à la lumière, la photosynthèse commence et la transpiration ne cessent d'augmenter, de fait la quantité de Co₂ assimilé augmente aussi. L'écart de température entre la feuille et l'air augmente, la feuille devient plus froide que l'air. (CORNIC et STREB)

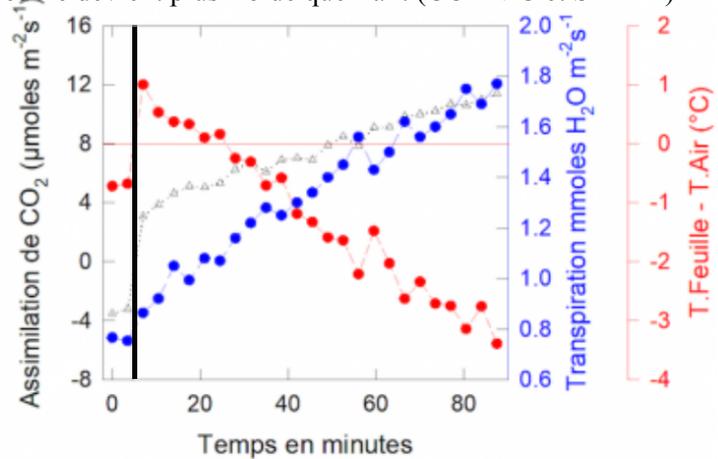


Figure 36 : Variations de l'assimilation de CO₂ par une feuille, de sa transpiration et de la différence de sa température avec l'air ambiant lors de son passage de l'obscurité à la lumière.
[Source : © Cornic et Streb, non publié]

Figure 36 : “Variations de l'assimilation de CO₂ (en gris) par une feuille, de sa transpiration (en bleu) et de la différence de la température de la feuille avec l'air ambiant (en rouge) lors de son passage de l'obscurité à la lumière (trait vertical). Les mesures sont faites sur une feuille de *Ranunculus glacialis*. La température (T) de l'air ambiant est de 20 °C. Le trait rouge horizontal indique l'égalité entre la température de l'air et de la feuille. La lumière pendant la mesure est proche de la saturation.” (Cornic et Streb)

La figure 37 montre l'impact de l'ensoleillement durant la journée sur un pêcher de la variété Queen Glory. La moyenne est effectuée sur le mois d'août 2022 avec en abscisse les heures et les W/m² en ordonnée.

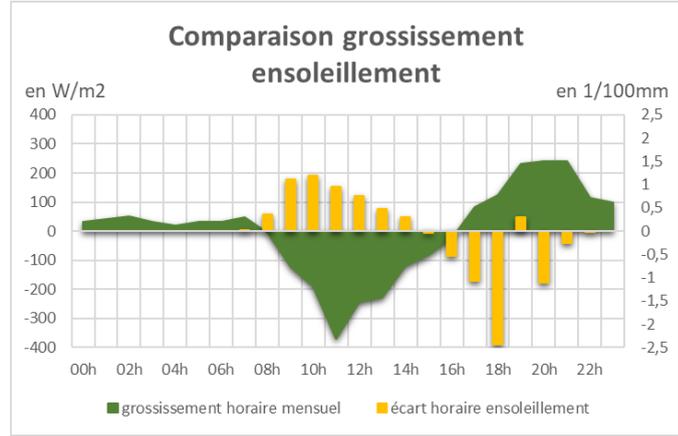


Figure 37 : Effet de l'ensoleillement (W/m²) sur les fluctuations de diamètre d'une branche de pêcher. Mesure effectuée avec les écarts d'ensoleillement horaire (ex : + 420W par m² d'ensoleillement à 11h par rapport à 10h.)
(Graphique réalisé avec les données du mois d'août 2022)
Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Agrossources

C'est l'ensoleillement qui semble provoquer le début de perte de diamètre subi par l'arbre en début de journée (résultat visible sur divers essais). L'augmentation du rayonnement perçu par capteur de rayonnement correspond à la phase de diminution du diamètre du pècher. Dès lors que le rayonnement baisse en début d'après-midi, le diamètre de la branche augmente. Ce moment de changement de dynamique correspond à la période où la quantité d'eau absorbée par les racines compense l'eau transpirée (Figure 34 page 32). En revanche durant la journée d'autres facteurs sont à prendre en considération pour expliquer les autres variations de la figure 37.

Humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air fait référence à la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air par rapport à la quantité maximale que l'air peut contenir à une certaine température. Elle influe sur la capacité des feuilles à évaporer l'eau et à réguler leur température. (RAVEN.P.H et al 2020 ; TOUSIGNANT.M. E, 2005 ; YUE.D, 1993)

Lorsque l'air est sec, c'est-à-dire avec une faible humidité relative, l'évaporation de l'eau à travers les stomates des feuilles est plus rapide et peut parfois être excessive. Comme évoqué précédemment, cette évaporation entraîne un refroidissement de la surface foliaire, car l'énergie thermique est utilisée pour convertir l'eau liquide en vapeur d'eau. Ainsi, une plus grande différence de température peut être observée entre les feuilles et l'air ambiant, les feuilles étant plus fraîches (RAVEN.P.H et al 2020) Si cet écart devient trop important cela peut occasionner des dommages. (RAVEN.P.H et al 2020)

En revanche, lorsque l'air est humide, l'évaporation de l'eau est plus lente, car l'air contient déjà de la vapeur d'eau. Dans le cas où il y a un cumul forte chaleur et forte humidité, cela limite la capacité des feuilles à se refroidir par évaporation, ce qui peut entraîner une élévation de leur température par rapport à l'air ambiant (CURE.P, 1941 ; TOUSIGNANT.M. E, 2005 ; RAVEN.P.H et al 2020). Cependant, une humidité saturante (100%) durant plusieurs jours consécutifs n'est pas observable en journée sous climat méditerranéen. Retenons ici qu'une humidité de l'air élevée permet de diminuer la perte en eau de la plante.

Les plantes ont développé des mécanismes adaptatifs pour faire face aux variations de l'humidité relative de l'air. Par exemple, certaines espèces ont développé des structures spéciales, telles que des poils piégeant l'humidité ou des cuticules épaisses servant d'isolant, pour réduire la perte d'eau par évaporation et maintenir une température foliaire adéquate (STEYN. H.M et al., 2021 ; RAVEN.P.H et al 2020).

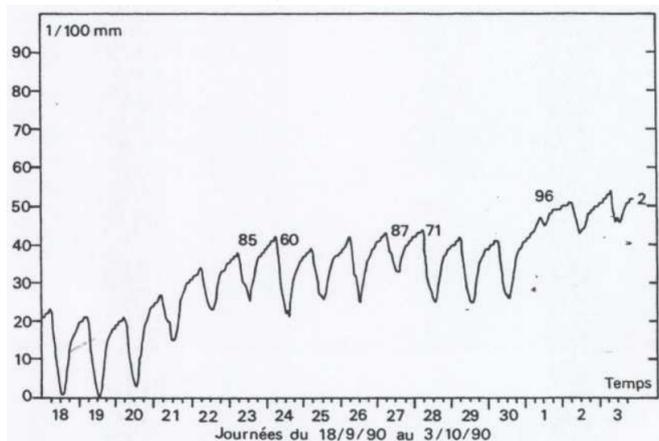


Figure 38 : Effets de modifications brutales de l'hygrométrie sur la croissance et l'amplitude de contraction d'une charpentièrre de clémentinier (les chiffres en indice indiquent l'hygrométrie moyenne en p . 100).
Source : H.VANNIERE, 1992 (étude menée avec le Pepista)

La variation brutale de l'humidité provoque de nombreuses perturbations dans la croissance et les amplitudes (Figure 38). Lorsque l'humidité relative diminue (60%) l'amplitude augmente et la croissance est fortement perturbée (VANNIERE. H, 1992). On observe une diminution ou un arrêt de la croissance, et si l'eau disponible n'est plus suffisante, un stress peut être observé. En effet, lorsque l'humidité de l'air est basse, la différence de pression de vapeur d'eau entre les feuilles et l'air ambiant est élevée, ce qui accélère la transpiration et la perte d'eau par les feuilles..

Donnons un autre exemple avec les courbes issues des données d'Agroressources (Figure 39). Le pommier augmente lui aussi ces amplitudes lorsque l'humidité est basse. Un des facteurs caractéristique d'une baisse de l'humidité est le vent (Figure 36).

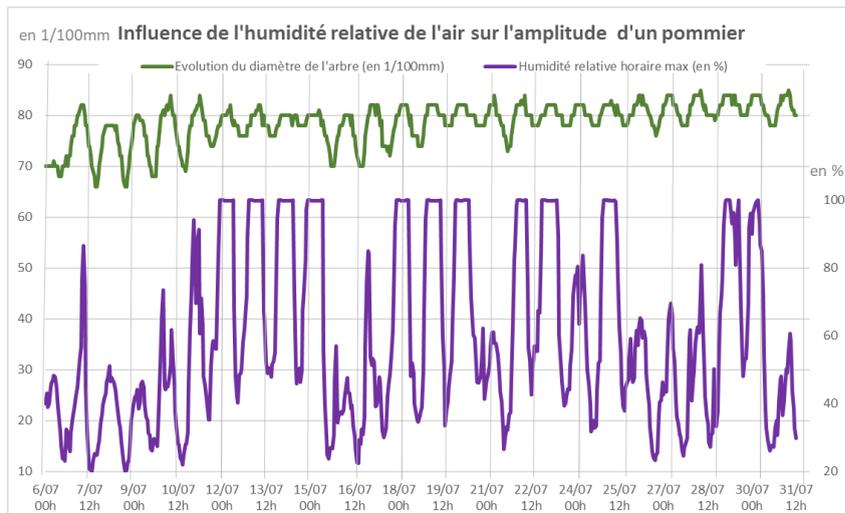


Figure 39 : Visualisation de la relation existante entre humidité présente dans l'air et l'amplitude et la croissance d'un axe de pommier (variété Rosy Glow) Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Agroressources

Voici un autre exemple de l'impact de l'humidité sur une courbe Pepista de vigne. La forte humidité et dans ce cas uniquement présente la nuit. On constate alors qu'une forte humidité nocturne semble amorcer un gonflement compensé par la journée plus sèche (Figure 40 ; HRmax annoté comprise entre 22h et 8h). Chez la vigne l'amplitude journalière semble être amplifiée par une humidité relative nocturne élevée.

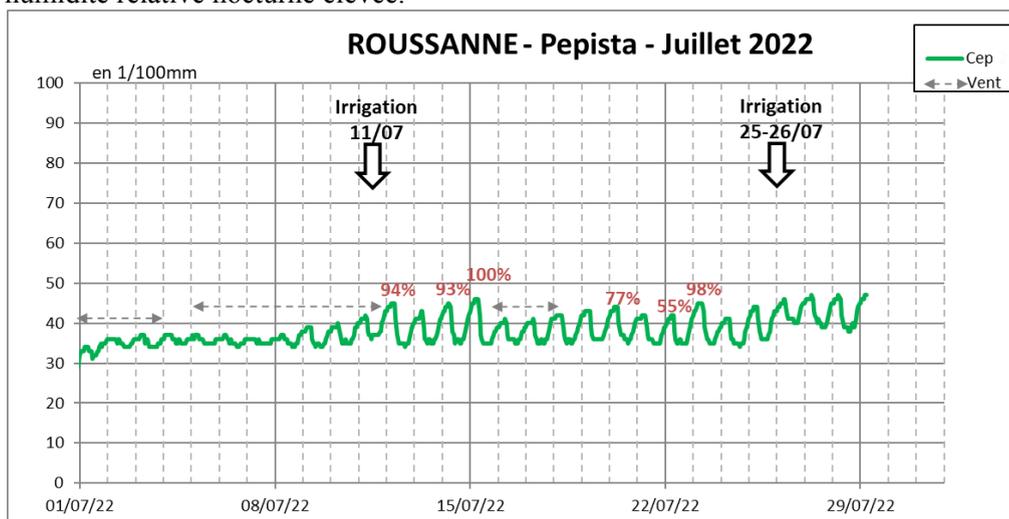


Figure 40 : Visualisation de l'effet de forte hygrométrie nocturne sur le végétal. (Roussanne est une variété de vigne) Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Agroressources

Cas particulier : le vent

Le vent fait diminuer l'humidité de l'air engendrant ses conséquences sur la transpiration. La présence de vents forts peut accélérer l'évaporation de l'eau à la surface des feuilles, entraînant une transpiration plus élevée du fait de l'augmentation du différentiel d'eau contenu dans l'air et la feuille. Cela peut conduire à une perte d'eau excessive et à un stress hydrique pour les plantes. Pour y faire

face, les stomates peuvent se fermer partiellement ou complètement, réduisant ainsi la perte d'eau. Cependant, cette adaptation a des répercussions sur la température et l'hydratation des feuilles. (PERRIER. A, 1978 ; RAVEN. P.H et al. 2020)

Comme nous allons le voir, les effets du vent sur la physiologie des feuilles varient en fonction des espèces végétales. Certaines plantes sont mieux adaptées aux conditions venteuses et ont développé des caractéristiques spécifiques pour minimiser les pertes d'eau par évaporation. Par exemple, des végétaux peuvent avoir des feuilles épaisses avec une cuticule cireuse qui limite la transpiration excessive, ou encore des poils limitant la perte en eau par transpiration. (STEYN. H.M et al., 2021)

Toutefois, le vent peut être bénéfique puisqu'il joue un rôle significatif dans l'activité photosynthétique de la végétation (Figure 41). En favorisant une meilleure diffusion du dioxyde de carbone (CO₂) et des molécules d'eau autour des feuilles, le vent augmente la disponibilité de CO₂ pour la photosynthèse, ce qui stimule la production de sucres et de nutriments essentiels à la croissance des plantes.. Le tableau ci-dessous illustre une augmentation de la photosynthèse nette lors de l'augmentation de la vitesse du vent en mètre/seconde. (PERRIER. A 1978)

Rôle de la vitesse du vent, soit des variations de résistances aérodynamiques sur le transfert de CO₂ (photosynthèse nette en mg m⁻² s⁻¹)

U(ms ⁻¹)	1	2	3	4	5	7
Photosynthèse nette	1,99	2,07	2,10	2,12	2,13	2,14

Figure 41 : Influence de la vitesse du vent sur la production de photosynthèse nette. Source : PERRIER. A, 1978

Comme évoqué précédemment, toutes les espèces ne réagissent pas de la même façon face à un épisode venteux. Le graphique qui suit (Figure 42) illustre l'impact du vent sur 4 espèces différentes : le pommier, la vigne, le pêcher et l'olivier.

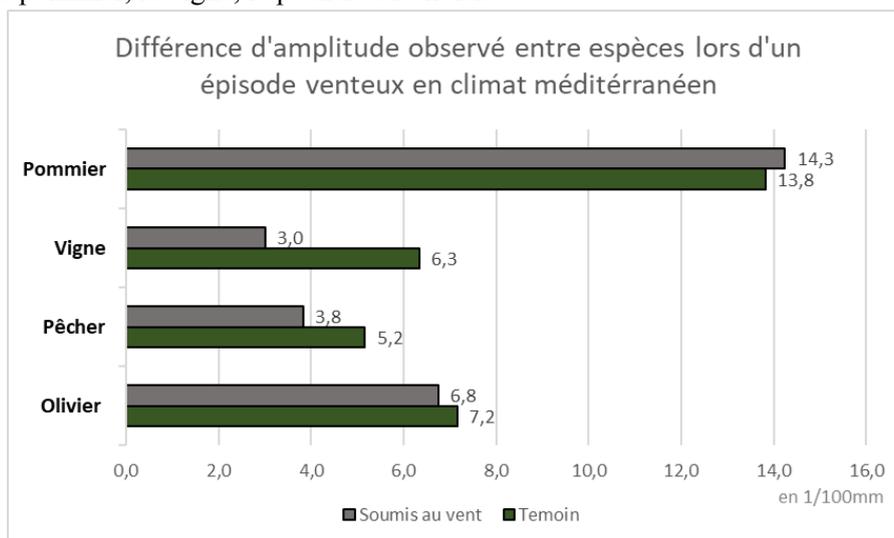


Figure 42 : Illustration des différences de réaction d'amplitude selon les espèces. Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Agroressources

Le pommier est la seule espèce qui semble augmenter son amplitude (soit la sollicitation hydrique sur les racines) en présence de vent. Au contraire, les 3 autres espèces diminuent leur amplitude. Comme pour les épisodes avec de fortes températures, c'est la vigne qui semble la plus à même de diminuer son amplitude. (Résultats obtenus sur la moyenne journalière de 4 jours compris entre le 4 et le 11 juillet 2022). L'explication de la réalisation de ce graphique est présentée en annexe 6.

La disponibilité en eau

La disponibilité en eau (réserve utile) n'est pas un facteur climatique mais varie considérablement en fonction des caractéristiques géographiques d'une région. Dans les régions arides et semi-arides, l'eau est souvent un élément limitant, ce qui génère des conditions d'éventuel manque d'eau pour les plantes. Les feuilles de ces régions doivent surmonter de nombreux défis pour maintenir leur équilibre hydrique. Avant de présenter les résultats observés sur la disponibilité en août. Il paraît important de définir ce qu'est un stress hydrique : D'un point de vue géographique et l'agricole un stress hydrique aussi appelé déficit hydrique "*s'installe lorsque l'eau disponible pour la plante ne lui permet pas de répondre à la demande climatique*" (NOR-EL-HOUDA et al 2020 ; DJEBBAR, 2012), avec le Pepista cette état est considéré atteint lorsque 2 jours successifs de perte de diamètre sont observé.

Les feuilles réagissent différemment en fonction de la disponibilité en eau. Lorsque l'eau est abondante, les stomates s'ouvrent pour permettre la transpiration. En revanche, en cas de stress hydrique, les plantes adoptent des mécanismes d'adaptation pour économiser l'eau. Les stomates se ferment partiellement ou complètement afin de réduire la transpiration et minimiser la perte d'eau. Un stress prolongé peut provoquer des embolies (bulle d'air dans les vaisseaux du xylème, SPERRY, 1988) limitant ainsi l'absorption de l'eau et ce même après que la période de stress soit passée. (LEMAIRE, 2019 ; CRUIZIAT et al, 2001). La mort de l'individu peut être observée dans le cas où un nombre trop important de vaisseaux se trouve embolisés (CHOAT et al., 2018 ; ADAMS et al., 2017).

En observant la réaction physiologique du clémentinier (Figure 43), on remarque un grossissement important les jours qui suivent une irrigation (45/100mm le 24 juillet) accompagné d'une diminution des amplitudes, montrant ainsi l'importance de la disponibilité de l'eau pour la croissance secondaire. La croissance est donc possible que lorsque la disponibilité en eau est suffisante.

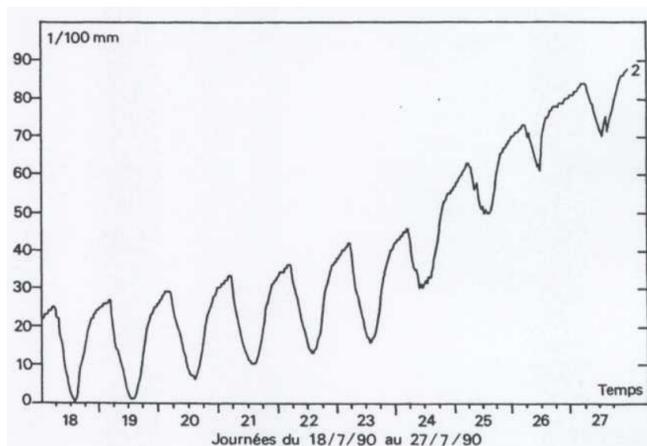


Figure 43 : Effets d'une irrigation de 45 mm apportée le 24 juillet, sur la croissance et l'amplitude de contraction d'une charpentièrre de clémentinier.
Source : H.VANNIERE, 1992 (étude menée avec le Pepista)

Toutefois, suivant l'état hydrique initial du végétal la réaction diffère, comme l'illustre le graphique qui suit (Figure 44). La courbe 1 représente un végétal avec une forte contrainte hydrique, le gonflement des tissus est franc et rapide. Le végétal, courbe 5 à une contrainte hydrique modérée, la réaction à l'irrigation est en comparaison à la courbe 1 elle aussi modérée. Le végétal 4 était sans contrainte hydrique avant l'irrigation (du 16), on remarque que la dynamique de croissance n'est pas modifiée.

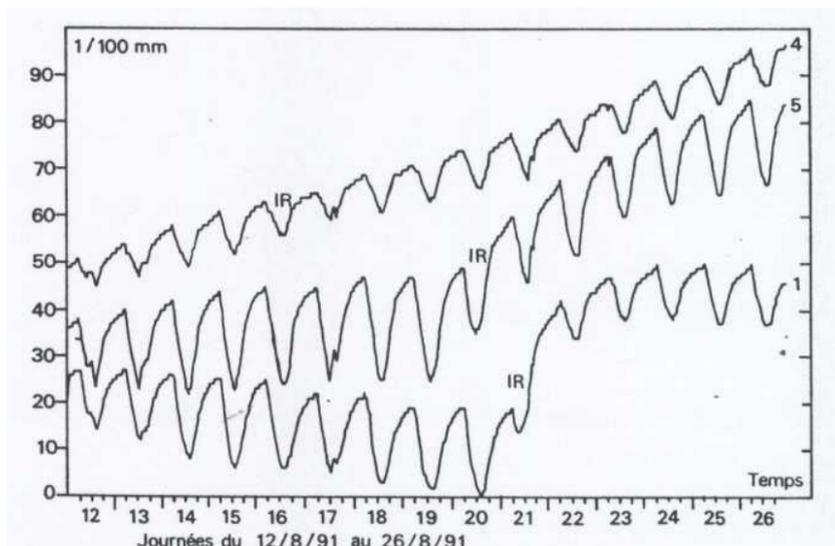


Figure 44 : Différences de comportement micrométrique de charpentières de clémentinier, lors d'une irrigation.
Source : H.VANNIERE, 1992 (étude menée avec le Pepista)

Nous pouvons en conclure que la réaction à l'irrigation est corrélée à l'état hydrique du végétal. Plus celui-ci est en manque d'eau (Figure 44, courbe 1), plus il va réagir de façon prononcée. Au contraire, s'il n'est pas en manque d'eau la réaction sera faible (figure 44, courbe 4) voir insignifiante (VANNIERE. H, 1992). Il est important de mentionner qu'en cas d'excès d'eau la plante subit un stress dû à l'anoxie de son système racinaire. (MACAIRE. A, 1984 ; TAKY. A, 2008)

Lors d'une forte précipitation (volume plus important que l'irrigation figure 44) la plante remplit ses réserves internes, ceci modifie son amplitude (presque inexistante le jour de la pluie en question) et la forte croissance effectuée ce jour limite la croissance des jours suivants (Figure 45), ce qui peut s'expliquer selon VANNIERE. H par «des phénomènes temporaires d'anoxie du système racinaire».

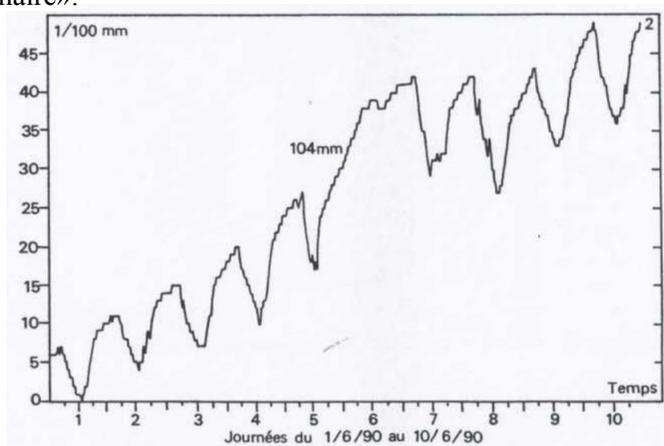


Figure 45 : Effets immédiats et conséquences d'une forte précipitation sur la croissance et l'amplitude de contraction d'une branche charpentière d'un clémentinier bien irrigué.
Source : H.VANNIERE, 1992 (étude menée avec le Pepista)

Toutefois, cette observation dépend de l'espèce observé (Agroressources) (Figure 45-46-47).

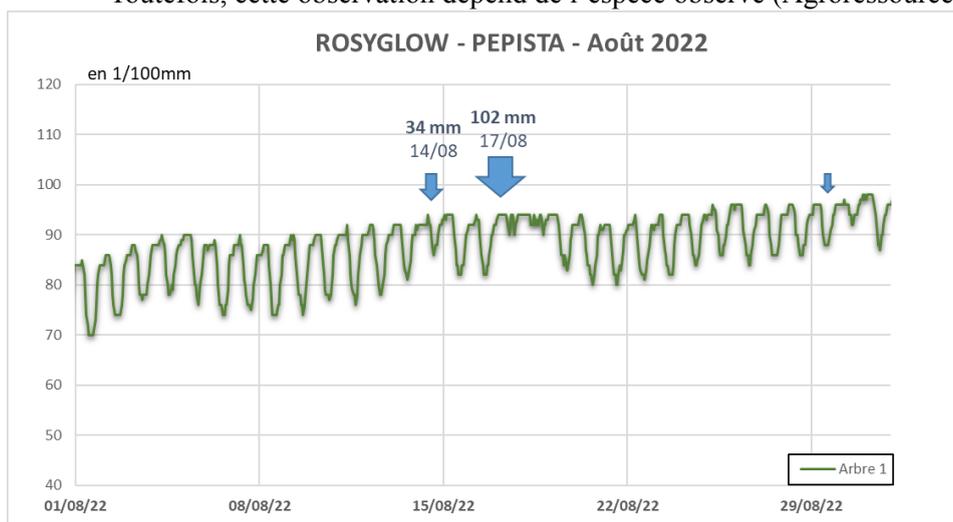


Figure 46 : Effet de diverses pluies sur le grossissement d'un axe de pommier (variété Rosy Glow)
Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Agroressources

Sur la page précédente est visible la réaction d'un pommier (variété Rosy Glow) (Figure 46), sur la figure 47 la réaction de cep de vigne (variété Mourvèdre). Les flèches bleues sont les pluies et les blanches sont les irrigations. Il semblerait que les pluies influencent de façon plus importante la vigne en comparaison avec le pommier. L'amplitude très faible obtenue chez le pommier du 17 au 19 août peut être due au manque d'ensoleillement durant la journée de forte pluie.

On visualise en figure 47 la différence d'amplitude entre deux ceps d'une même parcelle à quelques mètres de distance. Bien que l'amplitude fut similaire durant la première semaine d'août, celle-ci augmente pour le "Cep 2" suite à l'épisode venteux. On observe également que le cep 2 montre davantage de réactions face aux facteurs climatiques (pluie du 17 et 14 août). La différence de réaction des 2 ceps lors de ces pluies est marquée. En effet, les amplitudes du cep 1 sont nettement inférieures à celles de son voisin. Ces exemples montrent, là encore, les variations existantes entre différentes espèces, ainsi que les différences au sein d'une même variété, sous les mêmes conditions climatiques.

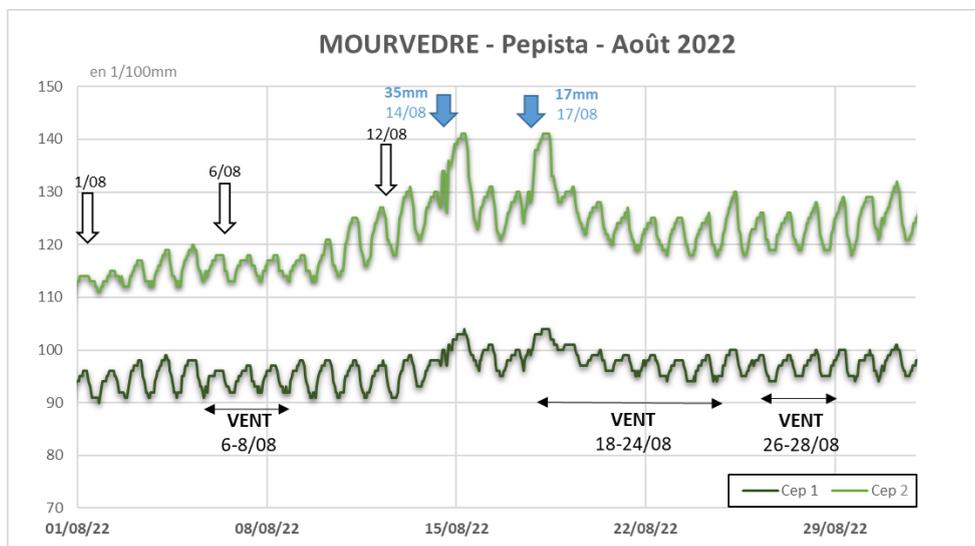


Figure 47 : Effet de deux pluies moyennes sur deux ceps de vigne
Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Agrosources

La croissance qui a été observé sur clémentinier 72h après n'est pas visible sur les ceps de vigne. Ceci peut être dû au vent. On peut voir sur les deux courbes de la vigne un début de croissance accompagné d'une augmentation de l'amplitude à partir de la fin de l'épisode de vent le 28 août. Là aussi le vent diminue l'amplitude et inhibe ou réduit fortement la croissance en diamètre des axes observés (Figure 47).

La figure 48 illustre la réaction d'un olivier à l'addition des facteurs hydrique, thermique et venteux. Pour cela, 4 périodes de 72h ont été étudiées : Une période témoin (tension ≈ 45 cb et une $T^{\circ}\text{max} \approx 32^{\circ}\text{C}$) ; Vent fort (tension ≈ 180 cb et une $T^{\circ}\text{max}$ de 29°C) ; $T^{\circ}\text{max} > 35^{\circ}\text{C}$ avec stress (tension > 239 cb, il s'agit de la mesure maximal pouvant être mesuré par les sondes, les tensions ont donc dépassées cette valeur) ; $T^{\circ}\text{max} > 35^{\circ}\text{C}$ après le stress (tension < 40 cb). Les relevés ont été effectués sur le même arbre. Les tensions ici évoquées correspondent à la médiane à 50 cm.

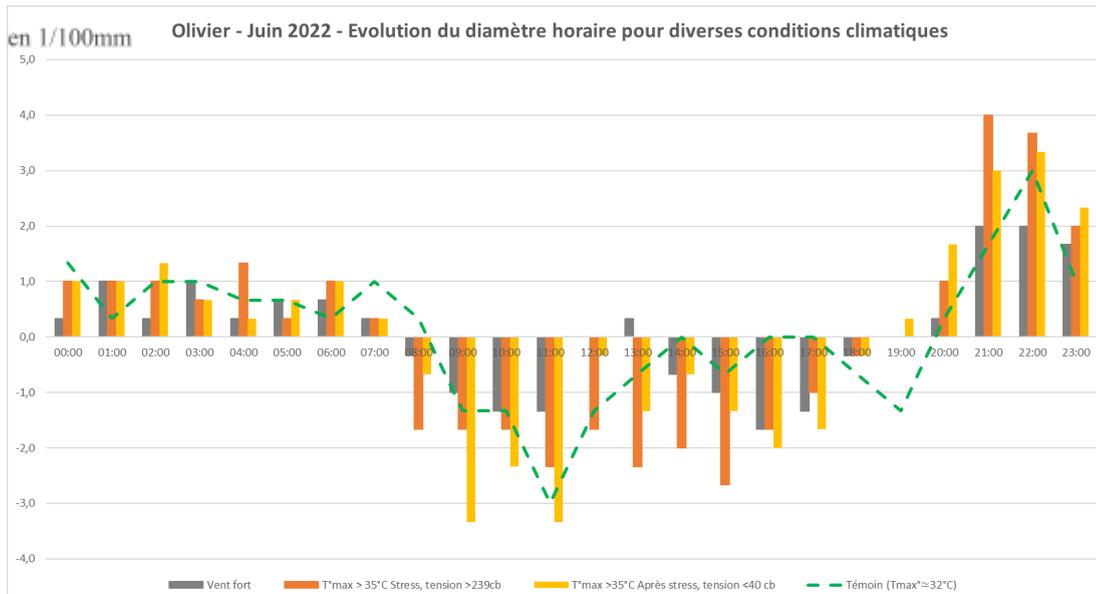


Figure 48 : Effets de différents facteurs climatique et de la disponibilité en eau sur l'évolution horaire de diamètre (étude menée sur olivier)
Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Aggroressources

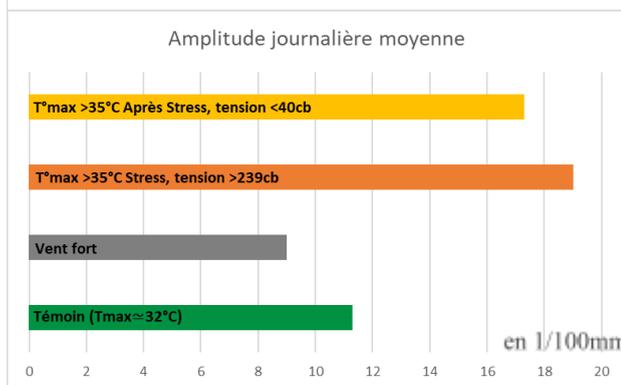


Figure 49 : Effets de différents facteurs climatique sur l'amplitude de l'olivier
Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Aggroressources

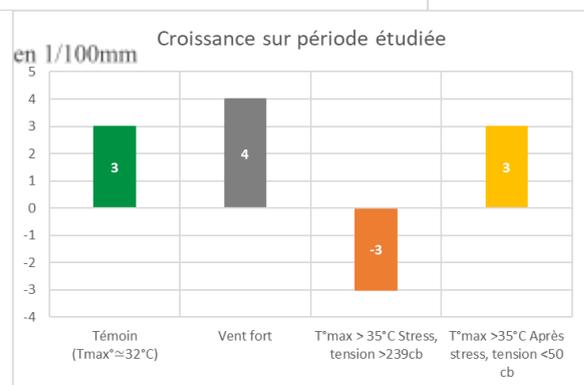


Figure 50 : Effets de différents facteurs climatique sur la croissance de l'olivier
Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Aggroressources

La figure 48 illustre le comportement du diamètre journalier de l'olivier pour les périodes concernées. Une irrigation est effectuée sur cette parcelle, elle accentue le grossissement à partir de 21h. C'est lors d'épisodes venteux que l'évolution du diamètre journalier est la moins importante (Figure 48), l'amplitude est basse comparativement aux autres périodes observées (Figure 49) mais sa croissance est la plus élevée avec 4/100mm (Figure 50). Cette croissance n'est pas visible sur la deuxième branche de l'olivier (Les courbes Pepista de cet olivier sont présentées en annexe 7), cette valeur est donc à prendre avec recul.

C'est avec une forte température cumulée à une tension élevée que l'amplitude et la plus élevée (Figure 49) ce qui peut engendrer un stress, lors de ce stress une perte de diamètre nette (-3/100mm) est visible (Figure 50). Une période ayant des températures similaires, mais une disponibilité en eau plus importante fait des amplitudes plus basses (Figure 49). Avec de forte température mais une disponibilité en eau suffisante une croissance de 3/100mm est observée (Figure 50). De fait, c'est la disponibilité en eau qui semble être le facteur le plus limitant pour l'amplitude, la croissance et les variations de diamètre journalier. Les détails des plages temporelles choisies sont présentés sous forme de graphique en annexe 7, la sélection sur les courbes Pepista est également visible dans cette annexe.

Autres Perturbations a prendre à considération

La nuit, une partie des stomates restent ouverts ou se réouvrent partiellement (DUCHARTRE. M.P, 1857 ; LOFTFIELD. JVG, 1921 ; DAMOUR. G, 2008 ; WESTGEEST. A.J, 2023), les plantes continuent alors à respirer et à subir une perte d'eau par évaporation à travers leurs surfaces foliaires (CAVENDER-BARES et al., 2007).

Une perte excessive d'eau pendant la nuit peut entraîner une diminution de l'hydratation des tissus, ce qui peut avoir plusieurs effets négatifs sur la croissance des plantes, comme une aggravation de stress hydrique visible en journée. Toutefois, la respiration dite de nuit est plus ou moins variable lorsque la plante est soumise à un stress hydrique (FLEXAS et al., 2005 ; RIBAS-CARBO et al., 2005 ; GALMES et al., 2007 ; DAMOUR. G, 2008)

On observe en figure 51 une autre perturbation nocturne observée lors de nuit froide. En effet, une forte diminution voir un arrêt de la croissance est visible lors de nuit froide, l'amplitude semble également être affectée. Ce phénomène a également été observé par J.-G. HUGUET sur pommier.

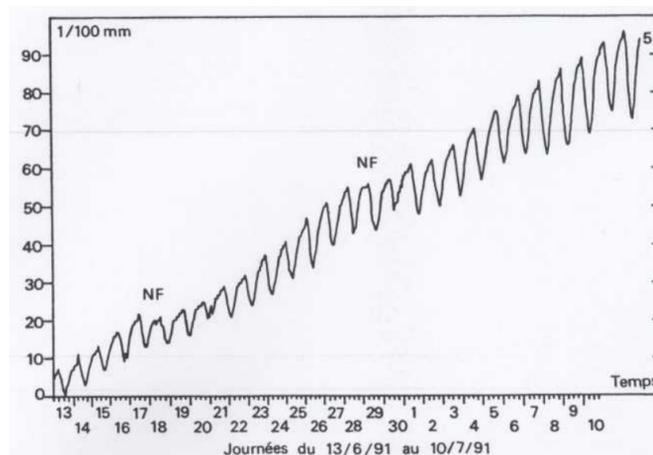


Figure 51 : ce graphique illustre l'influence de Nuit Froide (NF) sur la variation en diamètre d'un clémentinier.
Source : H.VANNIERE, 1992 (étude menée avec le Pepista)

Amplitude morphologique

Lorsqu'on observe les variations d'amplitude d'une branche à une échelle micrométrique allant de 0 à 2000 micromètres, on constate que cette variation est plus marquée pour les branches de fort diamètre (figure 52).

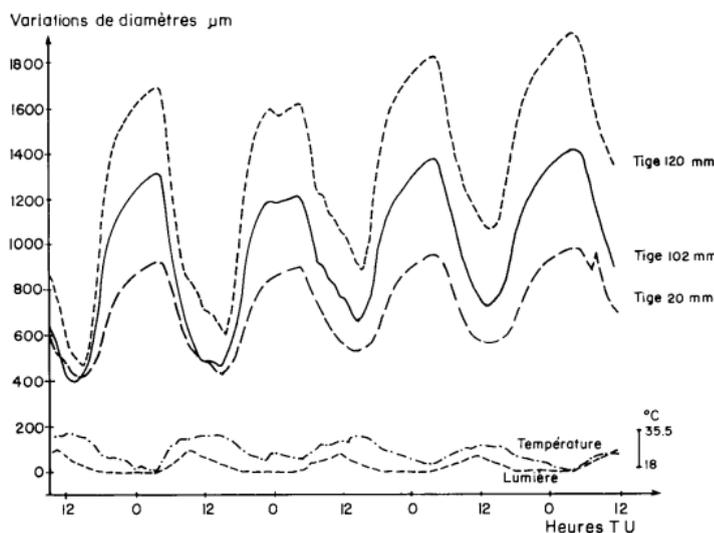


Figure 58 : Impact du manque d'eau sur la croissance
Source : GAUTIER. H et al., 2021
D'après Rahmati et al., 2015a et 2015b
(graphique réalisé avec Qualitree)

La figure 52 représente la contraction des axes selon leur diamètre. Plus le diamètre est important, plus la variation semble importante. Pourtant, comme l'a montré J-G. Huguet et al en 1985, une foie rapporté en pourcentage de contraction par rapport à la taille de la tige, celui-ci est plus important sur les axes de taille réduite. Ils ont alors émis l'hypothèse d'une sollicitation plus importante lorsque la tige est plus proche des feuilles. L'emplacement des capteurs peut de ce fait faire varier certaines mesures observées.

Ayant examiné en détail l'impact des facteurs climatiques sur la physiologie des plantes, nous pouvons désormais orienter notre attention vers la deuxième partie des résultats, qui se penche essentiellement sur les conséquences du changement climatique sur l'arboriculture et la viticulture, en se basant largement sur des données issues de la littérature scientifique.

L'arboriculture et la viticulture face aux dérèglements climatiques (résultats principalement issus de la bibliographie scientifique) :

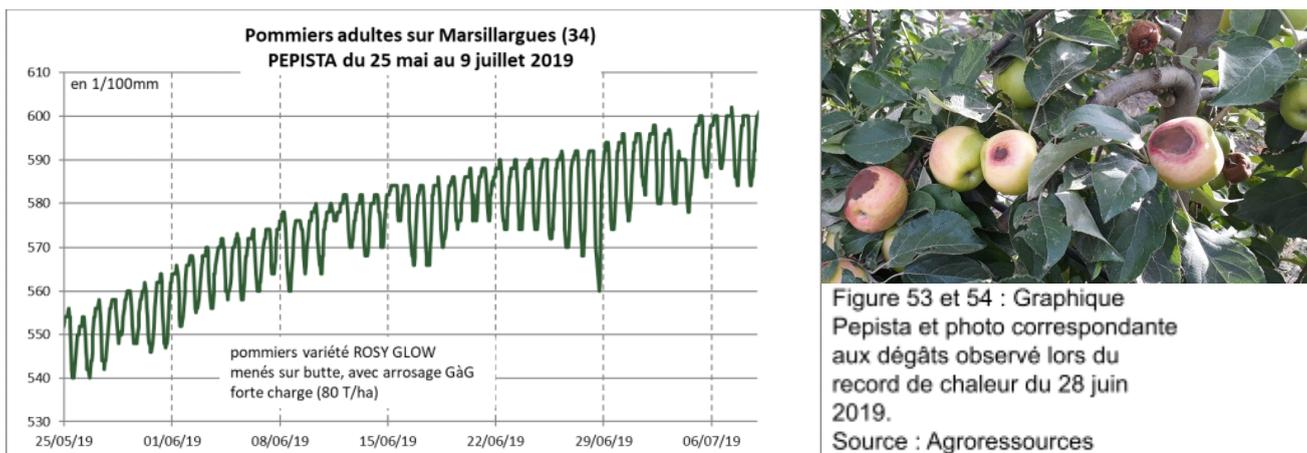
Selon le chercheur à Météo France Michel Dequé, le climat méditerranéen pourrait s'étendre dans l'avenir "*et toucher les régions côtières de l'Atlantique telles que l'Aquitaine, Midi-Pyrénées ou le Poitou-Charente*".

Les projections du GIEC annoncent une réduction des précipitations estivales de l'ordre de 20 à 30% en France d'ici le XXI^e siècle, tandis qu'une hausse de 0 à 10% est prévue pour l'hiver. Il est important de noter que ces estimations sont des moyennes générales pour le pays tout entier, mais notre région d'étude pourrait présenter des variations plus prononcées. Ces variations ont été observées dans une étude spécifique à l'arc péri-méditerranéen menée en 2008 par François LELIEVRE, Jean-Baptiste FINOT et Sylvain SATGER. En utilisant les données moyennes de précipitations de leurs stations de recherche, ils ont identifié une baisse de -30 à -50 mm en été (JJA) et une augmentation de 0 à +20 mm en hiver (DJF) pour le XXI^e siècle. En supposant que ces tendances soient linéaires sur le siècle, ils estiment une diminution moyenne de 12 à 20 mm en été et une augmentation de 0 à 5 mm en hiver pour la période 2000-2040. Les modifications hivernales passeraient pratiquement inaperçues, tandis que les modifications estivales (-15 à -25 mm au total si l'on considère MJJA) seraient perceptibles et contribueraient de manière significative à l'aggravation du déficit hydrique actuel. Les illustrations de ces prévisions climatiques sont fournies dans les figures de cette étude, présentées en annexe 8.

En parallèle, le quatrième rapport du GIEC publié en 2007 a utilisé vingt-cinq modèles climatiques mondiaux pour évaluer les répercussions du changement climatique aux horizons 2050 et 2100. Conformément à leurs résultats, la région méditerranéenne devrait connaître une augmentation des températures de +2 à +3°C d'ici 2050, puis de +3 à +5°C d'ici 2100. Ces élévations de température devraient se traduire par une réduction de l'humidité relative de l'air, une augmentation de la capacité de l'atmosphère à retenir l'humidité, une diminution de la couverture nuageuse, ce qui résultera en des précipitations moins fréquentes mais plus intenses, ainsi que des périodes de sécheresse plus fréquentes et prolongées, modifiant ainsi la répartition spatiotemporelle des précipitations (MILANO. M, 2010).

Grâce à l'ensemble des études menées sur le sujet (GIEC ; LELIEVRE et al., 2008 ; Malheiro et al., 2010, etc...), il est scientifiquement admis que le dérèglement climatique aura un impact sur le secteur agricole.

L'impact du changement climatique sur les cultures est aussi constaté par l'entreprise Agroressources. En effet, l'équipe perçoit une augmentation du Seuil d'Amplitude de Contraction (SAC) mesuré par Pepista. Les données de référence utilisées par Patrice Guinet dès 1993 ont fixé un SAC de 7 pour la vigne et les fruits à noyau et un SAC de 12 pour le pommier ; hors en 2022 des moyennes mensuelles s'élèvent à plus de 15 (Juin et Juillet) pour un pommier (Rosy Glow). En 2019 le mois de juin était à 15, juillet à 14, août à 17 et septembre à 15. A noter "que 2019 a été marquée par une canicule précoce, fin Juin avec des températures record en France (plus de 40°C à l'ombre). Cette canicule a fait des dégâts sur cultures dans l'Hérault et le Gard surtout." (Nathalie Broussard, Gérante d'Agroressources). Un record de chaleur a eu lieu le 28 juin 2019, une station météo d'un client d'Agroressources basé à Marsillargues dans l'Hérault, a enregistré 45,8°C. La courbe Pepista qui suit (Figure 53) illustre la réaction physiologique du pommier face à cet épisode extrême.



“Du 1er au 24 juin on observe sur le Pépista® une amplitude moyenne de 12/100mm. Du 25 au 28 juin il y a une hausse progressive des amplitudes qui atteignent 33/100mm le 28 juin !! C’est un record ! La station météo du domaine a enregistré le 28 juin à 17h une température de 45,8°C, avec une hygrométrie de 11%.

Mais malgré cela le Pépista® indique une absence de stress sur l’arbre lui-même : il a continué sa croissance. Les irrigations en juin étaient de 3,6 à 4,0 mm/jour, avec 1 jour d’arrêt par semaine.” (Nathalie Broussard, Gérante d'Agroressources).

En plus de la réaction physiologique de la branche, les fruits peuvent subir des coups de soleil pouvant entraîner une importante perte de fruits lors d'épisodes extrêmes comme celui du 28 juin 2019 (Figure 54). Cela reste exceptionnel, seuls 3 clients d'Agroressources ont été fortement touchés et uniquement ce mois de juin 2019. La dégradation du fruit se fait, soit directement par une décoloration de la peau, soit indirectement par le développement de brûlures sous la zone exposée au soleil (J-M LEGAVE et al., 2021). La principale cause de ces dommages est l'exposition directe au rayonnement solaire. Des températures élevées combinées à une forte luminosité peuvent provoquer différents types de coups de soleil. Par exemple, chez le pommier, un blanchissement de la peau du fruit suivi de nécroses peut être observé à partir d'une température de surface d'environ 30°C pour les fruits directement exposés à la lumière. Des craquelures de la chair apparaissent lorsque la température atteint environ 45°C, et une mortification de la peau et des cellules de la chair est observée à partir de 52°C (Schrader et al., 2008 ; 2011).

Toutefois, comme il a été montré dans l'ensemble de cette étude, les espèces et les variétés ne réagissent pas toutes de la même façon. De fait, elles ne sont pas toutes sujettes de la même façon au coup de soleil. Notamment, selon la couleur de l'épiderme du fruit. L'intensité et la durée d'exposition

conditionne l'apparition des symptômes, 01h00 peut suffire pour compromettre le devenir commercial du fruit. Les dégradations sont irréversibles, mais selon leur intensité, elles peuvent être masquées par l'apparition de divers pigments à l'approche de la maturité.

L'augmentation significative de la température de l'air lors de vagues de chaleur peut donc augmenter considérablement le risque de détérioration des fruits pendant leur développement. Par exemple, des pertes de rendement allant de 30% à 70% en raison de coups de soleil ont été enregistrées en 2009 dans des vergers de pommiers du sud-est de l'Australie, suite à une vague de chaleur exceptionnelle (THOMSON et al., 2014), mais de tel pourcentage reste exceptionnel.

Chez les agrumes, on observe également un arrêt complet de la croissance végétatif au-dessus de 40°C, ainsi qu'un retard de floraison et une potentielle réduction de rendement (KHEFIFI, H 2015).

Au niveau viticole, et au cours des décennies à venir, l'Europe sera confrontée à d'importants changements, notamment dans son zonage viticole, comme en témoignent sept indices distincts décrits par Malheiro et al. en 2010 (Figure 55). Il est prévu une réorganisation du zonage viticole européen, principalement dans le cadre du scénario A1B (avec une hausse moyenne estimée selon le GIEC à 2.8°C). Des répercussions défavorables sur la croissance et le développement de la vigne, ainsi que sur les paramètres de rendement et de qualité du vin, sont anticipées dans le sud de l'Europe, incluant des pays tels que le Portugal, l'Espagne et l'Italie (Malheiro et al., 2010). Selon cette étude, le contour méditerranéen métropolitain ne sera plus, à l'avenir, l'endroit le plus adapté pour la vigne française. La côte Ouest française sera alors plus intéressante pour les viticulteurs. Mais ce qui frappe c'est l'extension de la zone où la culture de la vigne sera possible. En effet, pratiquement la totalité du territoire français a un indice >0 (en couleur).

Les conséquences négatives du dérèglement climatique sur la zone étudiée dans ce rapport résultent de l'augmentation des effets cumulatifs de la chaleur et de la sécheresse pendant la période de croissance. Ces conclusions générales sont également étayées par des études antérieures, notamment celles menées par Kenny & Harrison en 1992, Jones et al. en 2005, et Stock et al. en 2005.

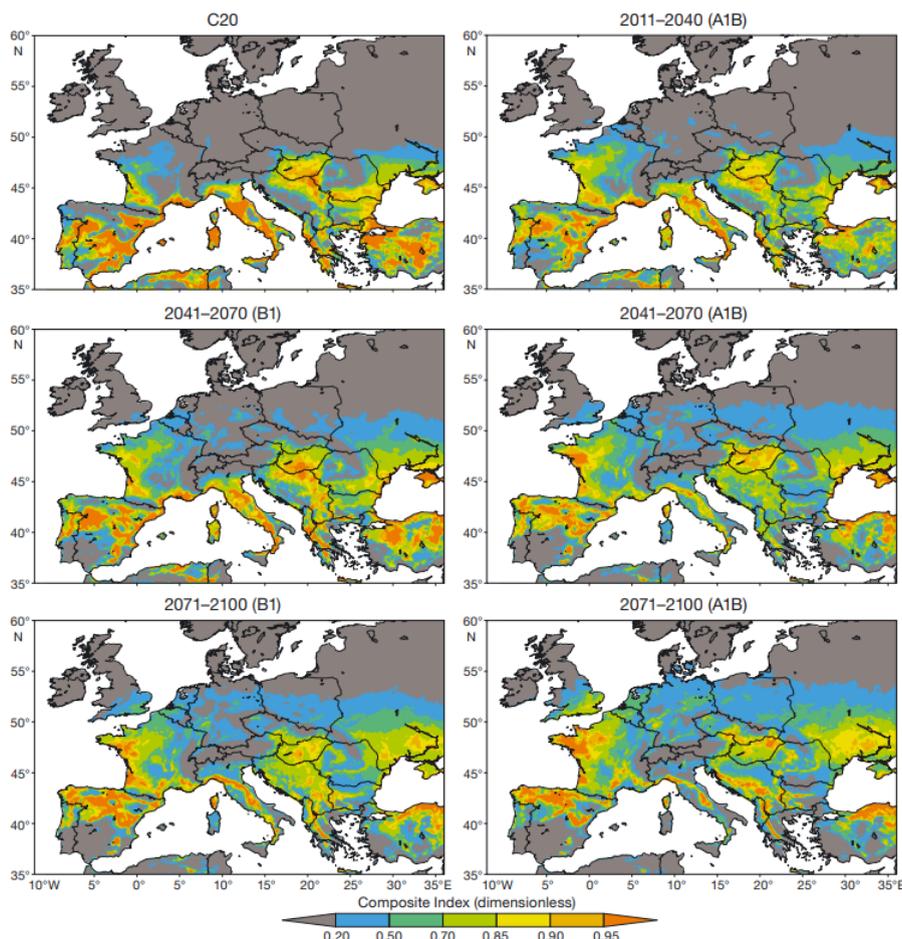


Figure 55 : Evolution spatio temporelle du zonage des espace favorable et défavorable à la culture viticole. Source : Malheiro et al, 2010

L'INRAE de Colmar de par une simulation schématisée (en annexe 9), montre qu'avec les hausses de température, la maturation des baies se déroulera au plus chaud de l'été. (aussi observé par (VAN LEEUWEN et DARRIET, 2016; VAN LEEUWEN et al., 2019)

La maturation des baies de vigne pendant des périodes de forte chaleur peut avoir des conséquences significatives. Tout d'abord, cela peut entraîner une maturation accélérée, ce qui peut affecter négativement l'équilibre et la qualité des raisins. De plus, les températures élevées pendant la maturation peuvent provoquer un stress hydrique (ATTIA. F, 2007), réduisant ainsi la qualité et la quantité de jus dans les baies. En outre, cela peut conduire à une augmentation de la concentration de sucre dans les raisins (Lereboullet et al., 2014), perturbant l'équilibre des saveurs et des niveaux d'acidité dans le vin final (VAN LEEUWEN et DARRIET, 2016; INRAE, 2018 ; VAN LEEUWEN et al., 2019).

Le dérèglement climatique provoque également une avancée de l'ensemble des stades phénologiques (VAN LEEUWEN et al., 2019). Cette observation est également visible en arboriculture. (BERTHOUMIEU (J-F) et al., 2021)

La figure 56 illustre la date moyenne de pleine floraison qui est de plus en plus précoce pour la Golden Delicious. La différence de date entre deux sites géographiques distincts, que sont la vallée de Pô, située à proximité de Parme dans le nord de l'Italie et la Rhénanie, région de l'ouest allemande frontière avec le Luxembourg, était stable jusque dans les années 2000. A partir de cette période, la date de pleine floraison se rapproche passant de 25 jours de décalage dans la fin des années 1980 à 16 jours dans le début des années 2010 soit une différence de 9 jours.

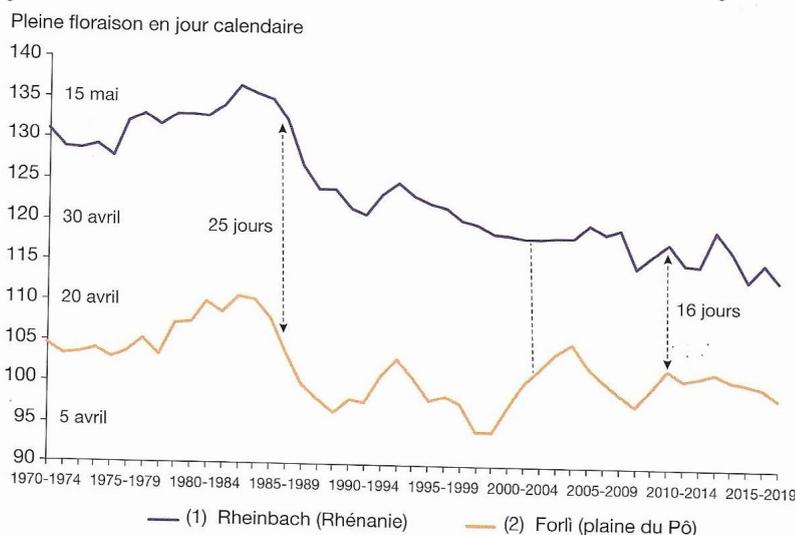


Figure 56 : Evolution de la date de pleine floraison pour deux sites géographiques différents.

Source : BERTHOUMIEU. J-F et al 2021 ; paru dans le livre Legave J.-M., coord , 2021. Les productions fruitières à l'heure du changement climatique, Edition Quae, Versailles, 464 p.

Avec l'avancement de la date de floraison, la question du gel revêt une importance capitale pour l'agriculture fruitière et viticole. En effet, l'avancement du débourrement, favorisé par l'augmentation des températures entre fin février et mars depuis les années 1980, expose davantage la vigne aux risques de gel sur les jeunes pousses (BADIER, 2013).

En arboriculture, on constate une plus grande variabilité dans la date de sortie de dormance (BERTHOUMIEU J-M et al., 2021).

Par ailleurs, certaines années, des pertes plus ou moins importantes de bourgeons floraux sont vraisemblablement causées par une combinaison de deux phénomènes : des températures excessives à l'automne et un manque de froid pendant les mois d'hiver (BOUBENNEC et al., 2014). Le cumul de froid durant l'hiver est en constante diminution. Néanmoins, le graphique figure 57 montre la non évolution dans les futures date de dernière gelée (J-F Berthoumieu et al., 2021). La précocité de la date

de floraison comparé à la date des dernières gelées rend la perspective des gelées printanières encore plus problématique.

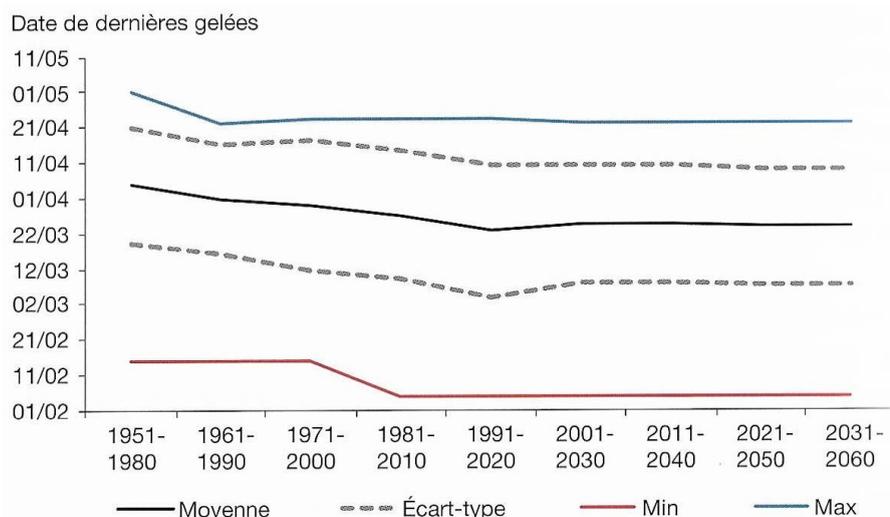


Figure 57 : Date de dernière gelées sous abri à Agen, historique et prévision.
Source : BERTHOUMIEU J-F et al 2021 ; paru dans le livre Legave J.-M., coord , 2021. Les productions fruitières à l'heure du changement climatique, Edition Quae, Versailles, 464 p.

La date de récolte est également modifiée de par le dérèglement climatique. De fait, comme le montre la figure 58, alors qu'il y avait en moyenne 14,7 jours de différences entre la récolte de la Golden Delicious d'Anjou et celle de la vallée du Rhône au début des années 1990, il n'y a plus au début des années 2010 qu'environ 8,4 jours de décalage entre la récolte des deux régions. La Golden Delicious se récolte de plus en plus tôt dans la saison (Figure 58). Cette même figure montre que les cerises commencent leurs maturations de plus en plus tôt.

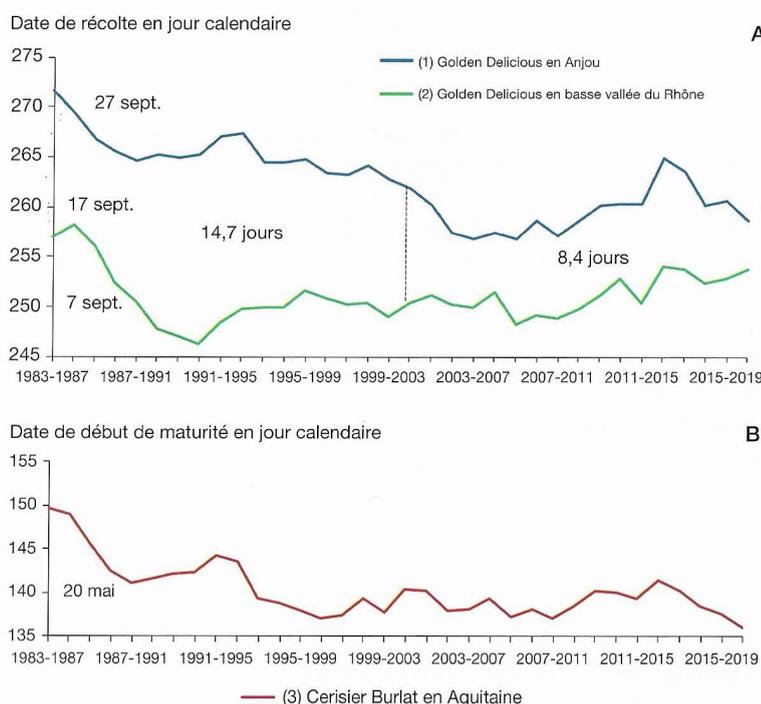


Figure 58 : Evolution de la date de récolte pour 2 espèces implantées dans 3 sites géographiques différents (A). Evolution de la date de récolte des cerisiers (en Aquitaine) (B).
Source : BERTHOUMIEU. J-F et al 2021 ; paru dans le livre Legave J.-M., coord , 2021. Les productions fruitières à l'heure du changement climatique, Edition Quae, Versailles, 464 p.

Des chaleurs excessives peuvent provoquer une chute des fleurs si elles ont lieu en début de saison (HILAIRE C et al., 2017; LEGAVE J.-M et al., 2021).

La perturbation de l'approvisionnement en eau de différentes espèces de fruits peut provoquer des fissures et des éclatements, principalement observés sur les fruits à noyau tels que les cerises et les nectarines, mais aussi sur les pommes, les raisins, les figues et autres fruits similaires. Ces fissures et éclatements sont fréquents dans les climats méditerranéens, en raison notamment de l'irrégularité des

précipitations. Certaines cultures peuvent subir des pertes nationales allant de 30% à 40%, comme cela s'est produit en 2008 (LEGAVE. J.-M et al., 2021).

Lorsqu'on examine les prévisions relatives aux températures, à la variabilité spatio-temporelle des précipitations et aux épisodes extrêmes, différentes perspectives émergent. L'organisme DRYAS, qui se penche sur les futurs climatiques, propose trois scénarios (optimiste, moyen et pessimiste) à l'horizon proche (2035), moyen (2055) et lointain (2085). En ce qui concerne la sécheresse des sols, les résultats des simulations indiquent une augmentation continue de la sécheresse des sols à l'échelle du territoire métropolitain tout au long du 21^e siècle. À la fin du siècle, les scénarios convergent vers des projections du niveau moyen d'humidité des sols correspondant à des niveaux extrêmement secs de la période de référence (1961-1990). Toutefois, ces résultats présentent des nuances selon les scénarios et les régions étudiées. L'aggravation de la sécheresse semble moins marquée dans les régions méditerranéennes qui connaissent déjà une sécheresse des sols importante dans le climat actuel. Cela ne signifie pas que l'humidité des sols sera moins importante dans ces régions, mais plutôt que l'évolution de la sécheresse des sols pourrait être plus prononcée dans les régions actuellement plus humides. L'accentuation des conditions de sécheresse atmosphérique est confirmée en fin de siècle, mais avec des variations régionales importantes sur la façade ouest du pays et dans le quart nord-est, où les conditions de sécheresse moyenne pourraient correspondre aux années actuelles les plus sèches. En revanche, les régions méditerranéennes pourraient être moins affectées par cette évolution. (BONNET. B, 2018 paru de la revue Réussir fruit et légume n°2 du numéro 388 ; MétéoFrance ; DRYAS)

Comme le montre GAUTIER. H et al., en 2021 d'après 2 études de Rahmati et al, parues en 2015, l'intensité du déficit hydrique impacte la croissance végétative (Figure 59). Les données précédemment citées ont mis en évidence que le changement climatique engendrera un cumul annuel de précipitations moins important. Par conséquent, des situations de déficit hydrique seront plus fréquent et plus virulent dans le temps et l'intensité. De fait, le dérèglement climatique impacte la croissance, le développement, la qualité des fruits (GAUTIER (H) et al., 2021) et à terme la pérennité de certaines espèces..

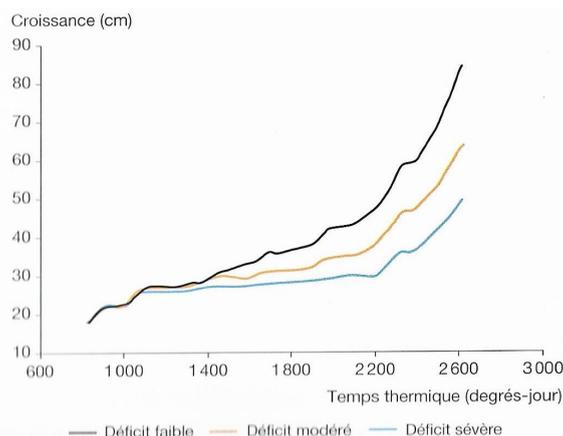


Figure 59 : Impact du manque d'eau sur la croissance
Source : GAUTIER. H et al., 2021
D'après Rahmati et al., 2015a et 2015b (graphique réalisé avec Qualitree)

Il est important de mentionner que la fluctuation des facteurs climatiques que nous avons évoqué impacte la biodiversité. Par conséquent, la population de ravageurs va être influencée (BRUN. L et al., 2021). Dans ce cas aussi il existe une grande variété d'espèces et de réaction possible face au changement du climat. Nous ne traiterons pas davantage ce sujet mais retiendrons ici l'impact du dérèglement climatique sur les diverses espèces de ravageurs.

Résultats d'autres études traitant de la comparaison de réaction d'espèce et variété dans la bibliographie scientifique:

Une diminution de la quantité d'eau présent dans le sol engendre une régulation stomatique au niveau des feuilles (CLAVET, 2000) permettant une diminution de la conductance stomatique (GIRONA et al., 2002 ; PERVICAL et al., 1998) limitant ainsi la perte en eau, ce qui se fait aux dépens de la photosynthèse ou d'autres phénomènes physiologiques (SHAGGUAN et al., 2000). L'étude tunisienne de DENDEN. M paru en 2008 analyse la physiologie de 3 espèces : le pommier (Meski Ahrech), le pêcher (Spring Crest) et le poirier (Lorka) afin de savoir lequel est le plus adapté au manque d'eau. Il en ressort que le pommier est le végétal avec l'anatomie favorisant le plus une transpiration élevée. (cuticule, longueur vaisseaux-cuticule, densité stomatique et longueur de diffusion);(DENDEN M et al, 2008). A contrario, le pêcher semble dans cette étude être le végétal le plus adapté avec des caractéristiques anatomiques réduisant les pertes d'eau transpiratoires. GIRONA et al. (2002), explique que le pêcher à une bonne régulation stomatique lui permettant de faire face à la sécheresse en réduisant davantage les déperditions hydriques transpiratoires. D'après l'étude de DENDEN et al de 2008, le poirier semble lui aussi être bien adapté, il est classé second dans cette étude (Figure 60).

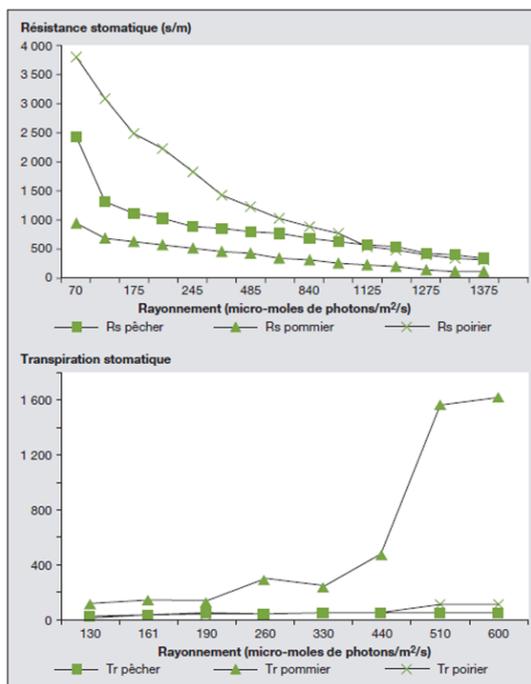


Figure 60 : Influence de la lumière sur la résistance et la transpiration stomatique de pommier, pêcher et poirier.
Source : DENDEN. M et al., 2008

Les variations intra-espèces sont importantes comme le montre l'étude marocaine de EL KADI (M) et al parue en 2020. Dans cette étude, on constate que le manque d'eau affecte différemment les variétés; sous déficit hydrique sévère (équivalent à 50% de l'évapotranspiration de la culture) de la nouaison à la récolte, la golden reinder perd 93% de son rendement alors que la Burki Gala seulement 10% (Figure 61). Le fruit est lui aussi impacté par le déficit hydrique le poids d'une Golden reinders diminue de 44%, quand la Galaval et la Royal gala perdent seulement 1% de leur poids. Les variétés Burki gala et Royal gala ont augmenté leur charge en fruit sur l'arbre, respectivement de 4% et 12%, alors que la Golden reinders a perdu 88% de sa charge. Outre la production de fruits, le végétal se trouve impacté par ce manque d'eau, et ceci est visible par la mesure de la croissance en longueur de ces pousses. Ce sont ici les variétés Fuji zen et Galaval qui sont le plus impactées avec 31% et 30% de croissance en moins. Les variétés Burki gala et Royal gala diminuent leur croissance de 6%. Les graphiques illustrant ces autres données ainsi que les données

sources sont présentés en annexe 10. L'ensemble de leurs résultats a permis de classer les variétés les plus adaptées au manque d'eau dans ce secteur géographique (Figure 61-62)

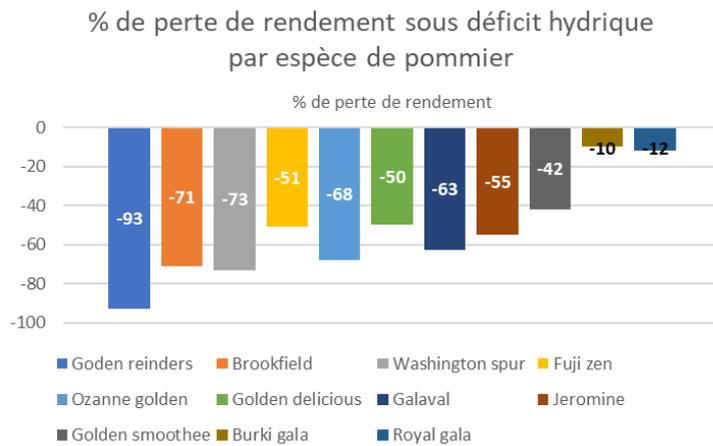
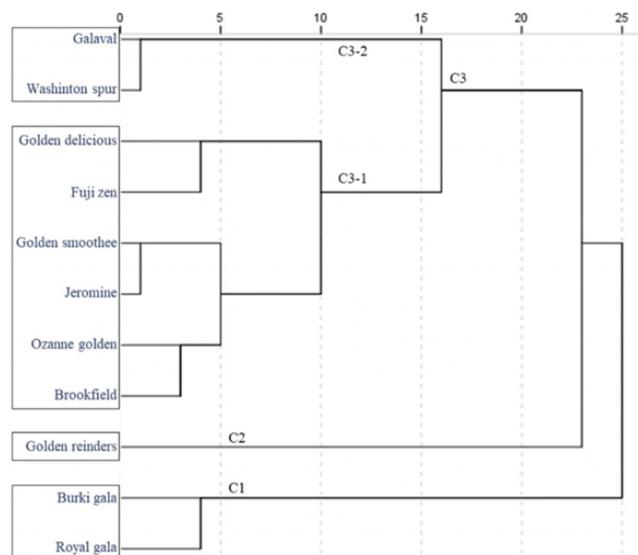


Figure 61 : Pourcentage de perte de rendement entre une culture témoin et une culture sous déficit hydrique. Données issues de l'étude d'EL KADI M et al., 2021 ; Graphique - Personnel

Figure 62 : Variété de pomme les plus adaptées à la culture sous déficit hydrique.
C1 : Adaptées
C2 : Moyennement adaptées
C3 : Non adaptées
Source : EL KADI et al., 2021



En plus de la variété, le porte-greffe utilisé peut permettre d'augmenter la résistance à la sécheresse. En annexe 11 est présenté un tableau relatant l'influence d'un porte greffe sur la tolérance au sec de l'arbre fruitier.

Avant de finir cette partie il est important de stipuler que le climat influence en plus du végétal, le fruit. MAGEIN écrit en 1994 dans son article intitulé «Influence du climat sur le grossissement des fruits» qu'«Au cours du premier mois après la floraison, c'est la température qui favorise la vitesse de croissance des fruits». En revanche, un haut niveau d'ensoleillement favorise la croissance estivale des pommes (MAGEIN, 1994). Et «Le diamètre moyen final augmente encore à partir de septembre, mais d'autant plus faiblement que le niveau de température, surtout nocturne, s'abaisse.» (MAGEIN, 1994)

Concernant les pratiques dans la viticulture et selon Benjamin BOIS, chercheur en Agro climatologie viticole, les viticulteurs vont devoir changer certaines de leurs pratiques.

“On est en train d'opérer un léger retour en arrière en ce qui concerne la vision du rapport entre feuilles et fruits. Jusqu'ici, on était dans une logique de maximisation de ce rapport et nous cherchions à obtenir une plus grande surface foliaire exposée possible. A présent, on commence à devoir retarder la maturité. Nous essayons des techniques qui passent par une adaptation des travaux

en vert, pour avoir un ratio feuille/fruit moins important avec notamment des rognages plus bas. Il est probable qu'il faille petit-à-petit revoir notre rapport entre le feuillage et le fruit. Car le cœur de la végétation devrait devenir de moins en moins humide et nous aurons à protéger les grappes de l'échaudage. Peut-être que les modes de conduite changeront, ils n'ont pas tous la même réaction à la contrainte hydrique et certains sont moins gourmands en eau. Les travaux en vert évolueront donc en conséquence. Il se peut également qu'apparaissent de nouvelles pratiques visant à retarder la maturation, arroser la canopée ou poser des filets d'ombrage”

La figure 63 illustre les stratégies proposées par BARBEAU. G, 2012, qui préconise trois étapes distinctes pour mettre en œuvre les changements nécessaires : court terme, moyen terme et long terme. Selon cet auteur, dans le court terme, il est essentiel de traiter les questions techniques et de gestion afin de faire face aux nouvelles conditions climatiques. Ensuite, dans un deuxième temps, il est nécessaire d'adapter le matériel végétal et les pratiques du viticulteur en conséquence. Enfin, à long terme, des considérations telles que l'eau (y compris l'irrigation) et le choix des cépages doivent être prises en compte.



Figure 63 : Adaptation au changement climatique viticole de le temps (court, moyen et long)
Source : BARBEAU. G, 2012

La question du choix des espèces peut également être posée en arboriculture. En effet, des agriculteurs souhaitent modifier les essences qu'ils cultivent, on observe alors une migration de certaines espèces. Agroressources suit d'ores et déjà des agriculteurs cultivant sous serre des avocats ou des grenades. Une carte des possibles, migration des espèces fruitières est proposée par Pierre Eric LAURI et al en figure 64. Le territoire méditerranéen pourrait accueillir limettier, manguier, pistachier, oranger, amandier ou clémentinier et voir migrer sous climat montagnard pommier et cerisier.

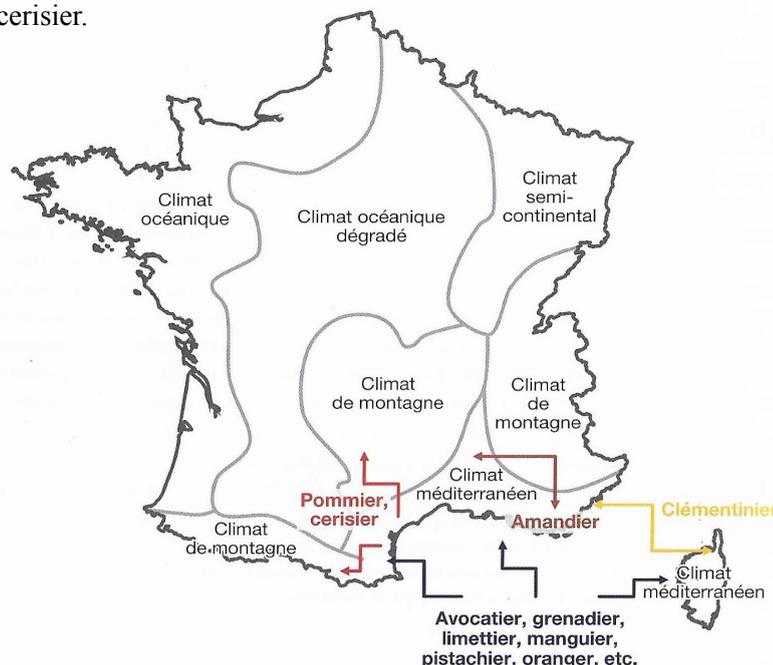


Figure 64 : Possible migration des cultures fruitières quittant et arrivant sous climat méditerranéen.
Source : P-E. LAURI, P. LUBELLO et F. WARLOP 2021

V- Discussion : mise en perspective et retour critique sur le stage

Perspectives d'optimisation de l'arboriculture et de la viticulture pour faire face aux facteurs climatique

1. Adaptation des choix variétaux : La sélection et l'adoption de variétés résistantes aux contraintes climatiques est cruciale. Il convient de poursuivre les efforts de recherche pour identifier des variétés d'arbres fruitiers et de vignes adaptées aux conditions climatiques changeantes.
2. Promotion de pratiques agroécologiques : L'intégration de pratiques agroécologiques offre des perspectives intéressantes pour renforcer la résilience des systèmes arboricoles et viticoles face aux aléas climatiques. Cela inclut la diversification des cultures, l'agroforesterie, la gestion de la biodiversité et l'amélioration de la santé des sols. L'adoption de telles pratiques peut contribuer à réduire les risques liés aux variations climatiques, à améliorer la conservation de l'eau et à réduire la dépendance aux intrants chimiques.
3. Intégration de technologies avancées : L'utilisation de technologies de pointe telles que les capteurs connectés, les drones agricoles et les modèles de prévision climatique peut offrir de nouvelles opportunités pour une gestion plus précise et proactive des cultures. Ces outils permettent de recueillir des données en temps réel sur les conditions climatiques, les besoins en eau des cultures et les risques potentiels, ce qui facilite la prise de décisions et l'ajustement des pratiques agricoles.
4. Renforcement des synergies entre les acteurs du secteur : La collaboration entre les chercheurs, les producteurs, les conseillers agricoles et les institutions publiques est essentielle pour relever les défis posés par les facteurs climatiques. En partageant les connaissances, les bonnes pratiques et les expériences, il est possible de favoriser l'innovation, d'élaborer des stratégies d'adaptation spécifiques aux territoires et d'assurer une transition vers des pratiques plus durables et résilientes.

Perspective d'amélioration de l'étude :

En se basant sur l'étude du grossissement de la tige d'arbre et de vigne, plusieurs perspectives d'amélioration de l'étude peuvent être envisagées :

1. Expansion de l'échantillonnage : Pour obtenir des résultats plus représentatifs, il serait bénéfique d'élargir l'échantillonnage en incluant un plus grand nombre d'arbres et de vignes dans l'étude. Cela permettrait de mieux saisir la variabilité des processus de croissance et d'obtenir des données plus fiables pour une analyse approfondie. En effet, nous constatons lors de l'utilisation de plusieurs capteurs Pepista sur une même culture ou sur un même arbre une différence de réaction. Est-ce la taille, la circonférence, l'exposition, l'âge, la quantité de fruit présent qui influence le plus la croissance et l'amplitude du sujet observé ? Autant de questions auxquelles les scientifiques devront répondre.
2. Intégration de plus de facteurs environnementaux et techniques : Il serait intéressant d'intégrer davantage de variables environnementales et techniques dans l'étude, telles que la fertilité du sol, la profondeur des racines, la charge et le rendement en fruit. Ces facteurs peuvent avoir une influence significative sur le grossissement de la tige et leur prise en compte permettrait de mieux comprendre les interactions entre les conditions environnementales et la croissance des arbres et des vignes.

3. Étude longitudinale à plus long terme sur un même végétal : Pour mieux appréhender les variations de croissance et les effets du changement climatique, une étude longitudinale sur une période plus longue serait bénéfique. Cela permettrait de suivre l'évolution du grossissement de la tige sur plusieurs saisons et de détecter les éventuelles tendances à plus long terme.

En intégrant ces perspectives d'amélioration, il sera possible d'enrichir l'étude sur le grossissement de la tige d'arbre et de vigne, offrant ainsi une meilleure compréhension des mécanismes de croissance et des interactions avec les facteurs environnementaux.

Retour d'expérience : apports et limites du stage

Ce stage a été pour moi une excellente expérience, extrêmement bénéfique, caractérisée par un bon environnement de travail dû à un personnel passionné, intéressé et intéressant. J'ai eu l'opportunité d'explorer en profondeur les différents aspects de l'entreprise, ce qui a enrichi ma compréhension de ses activités ainsi que du domaine agricole.

Sur le plan scientifique, le stage a permis d'acquérir une expertise pratique dans le domaine de la géographie agricole et environnementale ainsi que de la recherche agricole. La collaboration étroite de l'entreprise avec les agriculteurs a facilité l'observation directe des phénomènes sur le terrain, offrant ainsi une perspective privilégiée sur les interactions entre les facteurs climatiques et la végétation.

Outre ces aspects, il convient de noter certains avantages et limitations liés à ce stage. D'un côté, l'approche pratique et immersive a permis d'acquérir une expérience des réalités du terrain et de développer une compréhension approfondie des défis auxquels sont confrontés les agriculteurs. D'un autre côté, il est important de mentionner que Agrossources est une entreprise et non un institut de recherche. Les mesures ont été faites en plein champ, chez des agriculteurs, il y avait alors une incapacité à isoler spécifiquement les facteurs climatiques, comme cela aurait été possible dans un contexte de recherche plus contrôlé, ce qui a pu influencer les résultats obtenus. La complexité inhérente à l'étude des phénomènes climatiques en milieu naturel a rendu délicat le contrôle précis des variables, ce qui a pu engendrer des difficultés dans l'analyse des données. Cela peut constituer une limitation dans le cadre d'une étude scientifique cherchant à évaluer l'impact spécifique des facteurs climatiques sur la végétation. Toutefois, l'aspect pratique et technique du domaine m'a permis d'observer des impacts qui furent alors insoupçonnés comme par exemple une diminution du rendement en fruit d'une parcelle avec l'installation de filet, et une différence d'impact suivant les mailles de ce dernier. J'ai également pu observer la complexité et la non homogénéité de l'agriculture avec bien souvent des pratiques, des obligations selon AOP, ou des particularités géographiques rendant toute modélisation standardisée du monde agricole impossible. Et ce sont tous ces aspects qui rendent le travail dans le domaine de l'agriculture végétal fascinant.

Lien avec le master TRENT

Dans le cadre du stage effectué dans le domaine de la géographie environnementale, axé sur la transition environnementale des territoires (TRENT), une attention particulière a été accordée à l'importance des facteurs climatiques pour l'agriculture.

La transition environnementale joue un rôle essentiel dans l'adaptation de l'arboriculture et de la viticulture aux défis posés par le changement climatique. Elle implique l'adoption de pratiques agricoles durables, la gestion efficiente des ressources hydriques, la préservation de la biodiversité, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, ainsi que l'optimisation de l'utilisation des intrants agricoles. En mettant en œuvre des pratiques de gestion adaptées, telles que l'irrigation efficace (WITTLING, C et RUELLE, P, 2022), la sélection de variétés résilientes au stress climatique, la protection contre les gelées et la gestion intégrée des maladies et des ravageurs, il est possible de minimiser les effets néfastes du changement climatique sur l'arboriculture et la viticulture.

Par ailleurs, la transition environnementale offre des opportunités d'innovation et d'exploration de nouvelles approches dans l'arboriculture et la viticulture. Cela peut inclure l'introduction de techniques de culture alternatives, telles que l'agroforesterie, la permaculture ou l'adoption de pratiques agroécologiques, favorisant la résilience des écosystèmes agricoles et la préservation des ressources naturelles.

De plus, dans le cadre de mon stage, j'ai pu observer de manière concrète les impacts du changement climatique sur les pratiques agricoles. Ces impacts se sont traduits par la nécessité de déraciner certaines parcelles qui n'étaient plus adaptées aux nouvelles conditions climatiques. Des essences végétales, telles que la vigne, ont également été contraintes de recourir à l'irrigation, ce qui n'était pas le cas jusqu'ici. Ces observations ont mis en évidence les contraintes auxquelles les agriculteurs sont confrontés et les préoccupations qu'ils ressentent face aux changements en cours et à venir.

Malgré ces défis, les agriculteurs demeurent déterminés à exercer leur métier et à nourrir la France. Ils sont à la recherche de solutions innovantes pour faire face aux défis climatiques. Leur passion pour leur métier les pousse à prendre des décisions difficiles, telles que l'arrachage de cultures ancestrales au profit de nouvelles variétés plus adaptées aux changements climatiques actuels et futurs. Ils peuvent également compter sur des conseillers passionnés pour les aider, afin qu'à long terme la production française fruitière et viticole puisse s'adapter au défi que représente le dérèglement climatique.

En réponse à la problématique **"Comment l'utilisation de la technologie (via l'outil Pepista®) peut-elle nous permettre de mieux comprendre l'impact des conditions climatiques sur la physiologie des espèces utilisées dans l'arboriculture et la viticulture ?"** l'outil Pepista® a été essentiel pour mieux comprendre l'impact des conditions climatiques sur la physiologie des plantes en arboriculture et en viticulture. Il nous a fourni des données micromorphométrique comparables aux données météo, ce qui a permis de mettre en évidence le rôle prépondérant de la disponibilité en eau en tant que facteur de stress majeur. De plus, le Pepista® a révélé comment les variations climatiques quotidiennes, comme les journées chaudes et sèches, influent sur la physiologie des plantes, notamment sur l'amplitude journalière de contraction des tiges. Cette technologie a également facilité la modélisation des réponses climatiques des plantes, offrant ainsi des pistes pour anticiper les défis liés aux changements climatiques. En résumé, le Pepista® a répondu de manière pragmatique à notre problématique en éclairant notre compréhension des interactions entre climat et physiologie des plantes.

VI) Conclusion

Il paraît indubitable que les facteurs climatiques exercent une grande influence sur les processus de croissance secondaire et d'amplitude journalière de contraction pour l'arboriculture et la viticulture, particulièrement dans un contexte géographique caractérisé par un climat méditerranéen. L'analyse des interactions entre le climat et la croissance de la tige des arbres et des vignes a permis de mettre en évidence plusieurs observations.

Il ressort que la disponibilité en eau est le principal facteur de stress. Les périodes de fortes chaleurs, lorsque l'eau est suffisamment disponible, ne perturbe pas la croissance, mais elles augmentent l'amplitude journalière de contraction. Dans le cas de température similaire sans la disponibilité en eau nécessaire, un stress est observé en plus de l'augmentation de l'amplitude. Le vent, en revanche, limite principalement cette amplitude, sans avoir un impact déterminant sur la croissance elle-même. Une plus grande amplitude est corrélée à une plus grande difficulté pour les plantes à absorber l'eau nécessaire à leurs fonctionnements, tandis qu'une réduction de l'amplitude peut résulter d'une régulation stomatique, activé par la baisse de l'humidité relative, ce qui souligne l'importance de cette régulation dans l'adaptation des espèces aux conditions climatiques.

En outre, il est essentiel de noter que différentes espèces et variétés d'arbres et de vignes présentent des réponses variées aux facteurs climatiques. Ceci est dû à divers facteurs physiologiques tels que la densité, la conductance et la résistance stomatique des plantes, la taille des vaisseaux, l'épaisseur de la cuticule sont autant d'éléments à prendre en compte. Les espèces et/ou variétés ayant une physiologie adaptée à de faible quantité d'eau montrent une adaptabilité supérieure aux conditions méditerranéennes, montrant ainsi une meilleure résilience et une capacité accrue à maintenir une croissance satisfaisante malgré les contraintes climatiques. Par exemple, la vigne semble être particulièrement adaptée à l'arc méditerranéen et à son climat. L'olivier et le pêcher semblent assez résistants à la sécheresse pour faire face au futur climat méditerranéen résultant du changement climatique. Grâce à des études menées en climat méditerranéen mais dans un environnement plus aride (Maroc et Tunisie) il semble que des variétés de pêcher tel que la Spring Crest, et le poirier Meski Ahrech soit adaptés au futur condition climatique méditerranéenne (Ces indications s'appuient uniquement sur l'aspect climatique et hydrique ; des recherches supplémentaires sur les sols sont nécessaires.).

Enfin, les résultats indiquent que chaque individu peut réagir différemment aux mêmes conditions climatiques et géographiques, soulignant l'importance pour les chercheurs de multiplier les appareils de mesure ainsi que la manière dont les capteurs sont positionnés afin de garantir une analyse précise des résultats observés.

Pour finir, les prévisions de températures en hausse et les modifications des schémas de précipitations vont avoir des conséquences significatives pour le monde agricole. Par conséquent, il est impératif d'anticiper ces évolutions et d'adapter les pratiques agricoles en tenant compte des projections climatiques futures, en mettant l'accent sur la résilience des systèmes agricoles et sur des stratégies de gestion durable. Le schéma, figure 65 synthétise les impacts du changement climatique pour l'arboriculture.

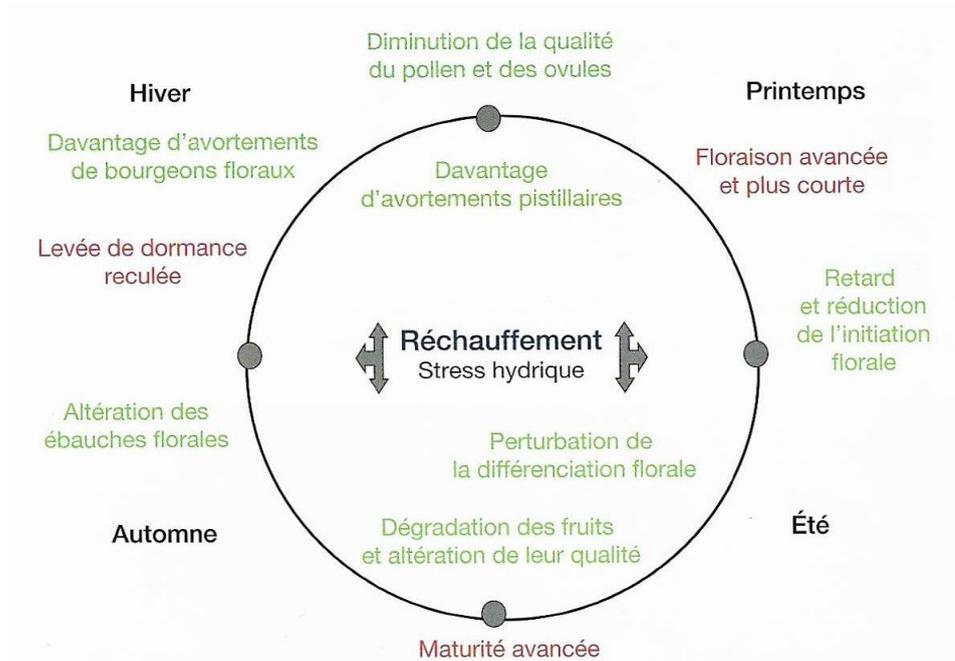


Figure 65 : Synthèse des impacts du changement climatique.

Source : LEGAVE J-M 2021

Légende : En rouge : impacts avérés ;
En vert : impacts potentiels

Bibliographie

Adams HD, Zeppel MJB, Anderegg WRL, Hartmann H, Landhäusser SM, Tissue DT, Huxman TE, Hudson PJ, Franz TE, Allen CD, Anderegg LDL, Barron-Gafford GA, Beerling DJ, Breshears DD, Brodrigg TJ, Bugmann H, Cobb RC, Collins AD, Dickman LT, Duan H, Ewers BE, Galiano L, Galvez DA, Garcia-Forner N, Gaylord ML, Germino MJ, Gessler A, Hacke UG, Hakamada R, Hector A, Jenkins MW, Kane JM, Kolb TE, Law DJ, Lewis JD, Limousin J-M, Love DM, Macalady AK, Martínez-Vilalta J, Mencuccini M, Mitchell PJ, Muss JD, O'Brien MJ, O'Grady AP, Pangle RE, Pinkard EA, Piper FI, Plaut JA, Pockman WT, Quirk J, Reinhardt K, Ripullone F, Ryan MG, Sala A, Sevanto S, Sperry JS, Vargas R, Vennetier M, Way DA, Xu C, Yezzer EA, McDowell NG. 2017. A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology & Evolution* 1: 1285–1291.

ATTIA, Faouzi. Effet du stress hydrique sur le comportement écophysologique et la maturité phénologique de la vigne *Vitis vinifera* L.: étude de cinq cépages autochtones de Midi-Pyrénées. 2007. Thèse de doctorat.

BARBEAU, G., NEETHLING, E., OLLAT, N., *et al.* Adaptation au changement climatique en agronomie viticole. *Enquête*, 2012, vol. 2011, no 2.

BARTHOLOMEW (E. T.). 1929 . Internal decline of lemons . III. Water deficits in lemon fruit caused by excessive leaf evaporation. *Ann . J. Bot.*, 13 . 102-117.

BERTHOUMIEU.J-F, DEBERT.P, MATHIEU.V et LEGAVE.J-M. 2021. Les conséquences des changements phénologiques sur la complémentarité et la régularité des productions fruitières. Chapitre 6 du livre : Les productions fruitières à l'heure du changement climatique (coord : LEGAVE J.-M)

BOIFFIN (J.), PAPY (F.), EIMBERCK (M.). Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. – Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 1988, 8 (8), pp.663-673. hal-00885148

BONNET. B. 2018. Faire face au changement climatique. Le verger du futur. *Prosp&active*. Cahier de Réussir Fruits et Légumes n°2 du numéro 388 p.30-38

BOUBENNEC, A., HILAIRE, C., LOUBET, D., *et al.* Spring frost and varietal sensitivity of peach: principles, risks and the situation in 2014 (Part 1-2-3).

BOUTIER.A, DEJEAN.C, DUBOCS.F, HECKENROTH.J-V, RACT MADOUX.A, RUELLE.P, URRUTY.N, 2022. Gestion tactique de l'irrigation à l'échelle de la parcelle. Chapitre 2 du livre : Guide pratique de l'irrigation (coord : WITTLING.C, RUELLE.P)

BRAEKKE, F.H and KOZLOWSKI, T.T. 1975. Shrinkage and swelling of stems of *Pinus resinosa* and *Betula papyrifera* in northern Wisconsin. *Plant and Soil* 43: 387-410.

BRUN.L, PARISI.L, PINCEBOURDE.S, SAUDREAU.M. 2021. L'anticipation des impacts du changement climatique sur les bioagresseurs en arboriculture fruitière. Chapitre 10 du livre : Les productions fruitières à l'heure du changement climatique (coord : LEGAVE J.-M)

BUREAU (S.). Modifications de l'environnement lumineux sur des grappes et des ceps de vigne : effets sur le potentiel aromatique des baies de Syrah et de Muscat de Frontignan. Thèse, 1998.

CAUE 77 : CRUIZIAT, P., AMEGLIO, T., & COCHARD, H. Mai 2022. L'arbre et l'eau. Consulté le 08 juin 2023, à partir de [L-ARBRE-ET-L-EAU.pdf (arboristes-sequoia.com)]

CABIBEL B, HOROYAN J. Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. III. Influence sur les flux de sève des modalités d'apport d'eau en irrigation localisée sur sol fissuré. *Agronomie*, 1991, 11 (10), pp.877-887. hal-00885340

CAVENDER-BARES, Jeannine, SACK, Lawren, et SAVAGE, Jessica. La sécheresse atmosphérique et la sécheresse du sol réduisent la conductance nocturne chez les chênes vivants. *Tree Physiology*, 2007, vol. 27, no 4, p. 611-620.

CHOAT B, BRODRIBB TJ, BRODERSEN CR, DUURSMA RA, LOPEZ R, MEDLYN BE. 2018. Triggers of tree mortality under drought. *Nature* 558: 531–539.

COCHARD, H and others, A new validation of the Scholander pressure chamber technique based on stem diameter variations, *Journal of Experimental Botany*, Volume 52, Issue 359, 1 June 2001, Pages 1361–1365, <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.359.1361>

COLAS-BELCOUR, François, RENOULT, Roland, et VALLANCE, Michel. Synthèse eau et agriculture. 2015.

CRUIZIAT, Pierre, AMÉGLIO, Thierry, et COCHARD, Hervé. La cavitation: un mécanisme perturbant la circulation de l'eau chez les végétaux. *Mécanique & industries*, 2001, vol. 2, no 4, p. 289-298.

CURÉ. Pierre. Évaporation et transpiration Action des alternances de sécheresse et d'humidité sur la structure des plantes. In : *Annales de la Faculté des sciences de Toulouse: Mathématiques*. 1941. p. 49-256.

DAMOUR, G, Bases théoriques et approches expérimentales de la modélisation des effets de la contrainte hydrique sur les échanges gazeux foliaires du manguier et du litchi. Thèse. Mars 2008.

DENDEN, Mounir, TIBA, Béchir Ben, et HLAOUA, Wassila. Caractéristiques morphologiques, anatomiques et physiologiques de tolérance à la sécheresse du pêcher, du poirier et du pommier. *Cahiers Agricultures*, 2008, vol. 17, no 5, p. 445-449 (1).

DJEBBAR R., (2012). Effet du stress hydrique sur le métabolisme cellulaire de plantes de tabac sauvage (*Nicotiana sylvestris*) et d'un mutant mitochondrial (CMSII). Thèse de Doctorat d'état. Université Houari Boumediene, Alger, Algérie.97p

DOBBS, R.C. and SCOTT, D.R.M. 1971. Distribution of diurnal fluctuations in stem circumference of Douglas-fir. *J. Forestry* 62: 252-255.

DOORENBOS, J. *Réponse des rendements à l'eau*. Food & Agriculture Org., 1980.

DREYER.E et EPRON.D. Effets de la sécheresse sur la photosynthèse : mécanisme d'action et technique d'étude. *Physiologie des Arbres et Arbustes en zones arides et semi-arides*, p.67-84. 1991 - Groupe d'Etude de l'Arbre - Paris, France

DUCHARTRE, M. P. Observations sur la transpiration des plantes pendant la nuit. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 1857, vol. 4, no 10, p. 1024-1033.

EL KADI. M, RAZOUK. R, CHARAFI. J et BOUDA. S publié par BAHRI. (s. d.). *TOLERANCE AU STRESS HYDRIQUE DE QUELQUES VARIETES DE POMMIER EN CULTURE DANS LE MOYEN ATLAS*. Par | INRA Meknès Magazine. <https://mag.inrameknes.info/?p=2291>

FLEXAS et al. 2005 The effects of drought in plant respiration. In H Lambers, M Ribas-Carbo, eds, *Advances in Photosynthesis and Respiration. Plant Respiration: from Cell to Ecosystem*, Vol 18. Springer, Dordrecht, p177-194

FRESNEAU, Chantal, GHASHGHAIE, Jaleh, et CORNIC, Gabriel. Drought effect on nitrate reductase and sucrose-phosphate synthase activities in wheat (*Triticum durum* L.): role of leaf internal CO₂. *Journal of Experimental Botany*, 2007, vol. 58, no 11, p. 2983-2992.

GALMES et al. 2007 Response of leaf respiration to water stress in Mediterranean species with different growth forms. *Journal of Arid Environments* 68: p206-222

GARNIER (E.) and BERGER (A.). 1985. Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress. *J. Hort. Sci.* 60. 47-56.

GAUTIER.H, BALDAZZI.V, BERTIN.N, VERCAMBRE.G, GENARD.M, QUILOT-TURION.B, DIA.Z, JULHIA.L et PAILLY.O. 2021. Anticiper les impacts du changement climatique sur la qualité des fruits et le rendement, l'apport de la modélisation.. Chapitre 9 du livre : Les productions fruitières à l'heure du changement climatique (coord : LEGAVE J.-M)

GIRONA, J., MATA, M., FERERES, E., *et al.* Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. *Agricultural Water Management*, 2002, vol. 54, no 2, p. 107-122.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), (2007). *Climate Change 2007: The physical Science basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment*, Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996p.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2023). *Climate Change 2023: Impacts of Climate Change on Coastal Areas. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

HALMA (F.F.). 1934 . Some phases in water relations in citrus . Proc. Am . Soc. Hortic . Sei., 31, 108-109

HELLER, (R.) « SÈVES » 2020, Encyclopædia Universalis [en ligne], consulté le 21 juin 2023. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/seves/>

HOPKINS, William G. *Physiologie végétale*. De Boeck Supérieur, 2003.

HUGUET (J .G .) et al. 1985 . Appréciation de l'état hydrique d'une plante à partir des variations micrométriques de la dimension des fruits ou des tiges au cours de la journée . Agronomie, 5 (8), 733-741 .

IRVINE, J. and GRACE, J. 1997. Continuous measurements of water tension in the xylem of trees based on the elastic properties of wood. *Planta* 202: 455-461

JOLY, D, BROSSARD, T, CARDOT, H, *et al.* Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 2010.

JONES, Gregory V., WHITE, Michael A., COOPER, Owen R., *et al.* Climate change and global wine quality. *Climatic change*, 2005, vol. 73, no 3, p. 319-343.

JUILLION (P.) Analyse et modélisation des effets de l'ombrage sur la physiologie, la croissance, le rendement et la qualité des fruits du pommier (*Malus domestica* Borkh.). Thèse, soutenue en Juin 2022.

KATERJI N.B., 1982. Etude et modelisation des transferts hydrique dans le système sol-plante-atmosphère. Thèse Doct. Etat, juin 1982, Paris VII, 197 p. + annexe, 99p.

KENNY, G. J. et HARRISON, P. A. The effects of climate variability and change on grape suitability in Europe. *Journal of Wine Research*, 1992, vol. 3, no 3, p. 163-183.

KHEFIFI, Hajer. *Etudes physiologiques et génétiques de caractères morpho-physico-chimiques des fruits d'agrumes au cours de la maturation jusqu'à l'abscission*. 2015. Thèse de doctorat. Montpellier SupAgro; Institut national agronomique de Tunisie.

KOZLOWSKI, TT. 1972. Shrinking and swelling of plant tissues. In: T.T. Kozlowski (Editor) *Water Deficits and Plant Growth*, Vol. 3. Academic Press, London, pp. 1-64.

LAURI. P-E, LUBELLO.P, WARLOPF, 2021. L'adaptation des productions fruitières au changement climatique par l'évolution des systèmes et des aires de cultures. Chapitre 12 du livre : Les productions fruitières à l'heure du changement climatique (coord : LEGAVE J.-M)

LEGAVE J.-M., coord , 2021. Les productions fruitières à l'heure du changement climatique, Edition Quae, Versailles, 464 p.

LEMAIRE, Cédric. Etude structurelle et fonctionnelle de la plasticité de la vulnérabilité à l'embolie chez le peuplier. 2019. Thèse de doctorat. Université Clermont Auvergne [2017-2020].

LENNE, Catherine. *Dans la peau d'un arbre. Secrets et Mystères des Géants qui vous entourent*. Belin, 2021.

LENNE, Catherine. *Dans la peau d'une plante*. Belin, 2014.

LELIEVRE F., SALA S., RUGET F., VOLAIRE F. (2011). Evolution climatique du Sud de la France 1950-2009, Projet CLIMFOUREL PSDR-3, Régions L-R, M-P, R-A. Série Les Focus PSDR3.

LELIÈVRE, François, FINOT, Jean-Baptiste, et SATGER, Sylvain. Le changement climatique récent et futur sur l'arc péri-méditerranéen. 2008.

LEREBOULLET, Anne-Laure, BELTRANDO, Gérard, BARDSLEY, Douglas K., *et al.* The viticultural system and climate change: coping with long-term trends in temperature and rainfall in Roussillon, France. *Regional environmental change*, 2014, vol. 14, no 5, p. 1951-1966.

LOFTFIELD.JVG. 1921. The behavior of stomata. Carnegie Institution of Washington, Publication No.314. Washington, USA

MACAIRE, Alain. Le dépérissement du Chêne pédonculé en forêt communale d'Amance (Aube). *Revue forestière française*, 1984, vol. 36, no 3, p. 201-205.

MAGEIN, H. Influence du climat sur l'évolution du grossissement des fruits. *Fruit Belge*, 1994, vol. 62, no 448, p. 54-58.

MALHEIRO, Aureliano C., SANTOS, João A., FRAGA, Helder, *et al.* Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Climate research*, 2010, vol. 43, no 3, p. 163-177.

MILANO. M. Pan Bleu : Les impacts prévisibles du changement climatique sur les ressources en eau de quatre grands bassins versants Méditerranéens. 2010.

NOR-EL-HOUDA, BOUGATOCHE, MAZENA, BOUATI, et WISSAME, SAADAOUI. Etude de la réponse de blé tendre (*triticum aestivum*l.) au stress hydrique. 2020.

PERCIVAL, D. C., PROCTOR, JT A., et PRIVÉ, J.-P. Gas exchange, stem water potential and leaf orientation of *Rubus idaeus* L. are influenced by drought stress. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 1998, vol. 73, no 6, p. 831-840.

PEARSON, G.A. 1924. The growing season of western yellow pine. *J. Agri. Res.* 29: 203-204.

PERRIER, A. L'évapotranspiration et la photosynthèse d'une culture en fonction de ses propriétés physiques. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 1978, vol. 203.

PLÉNET, Daniel, SIMON, Sylvaine, VERCAMBRE, Gilles, *et al.* Systèmes de culture en arboriculture fruitière et qualité des fruits. *Innovations Agronomiques*, 2010, p. 85-105.

RAHMATI, Mitra, DAVARYNEJAD, Gholam Hossein, GÉNARD, Michel, *et al.* Peach water relations, gas exchange, growth and shoot mortality under water deficit in semi-arid weather conditions. *PLoS One*, 2015a, vol. 10, no 4, p. e0120246.

RAHMATI, Mitra, VERCAMBRE, Gilles, DAVARYNEJAD, Gholamhossein, *et al.* Water scarcity conditions affect peach fruit size and polyphenol contents more severely than other fruit quality traits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015b, vol. 95, no 5, p. 1055-1065.

RAMBAL, Serge. Comment les arbres méditerranéens affrontent-ils l'imprévisibilité de la ressource en eau?. *La Houille Blanche*, 2002, no 3, p. 33-37.

RAVEN, P. H., JOHNSON, G. B., MASON, K. A., LOSOS, J. B., DUNCAN, R. D. Biology, 12th edition. Published by McGraw-Hill Education, 2020.

RAZUNGLES (A.), BUREAU (S), BAUMES (R). (2000). Effet de l'ombrage respectif des ceps et des grappes de Muscat sur leurs teneurs en composés volatils libres et glycosylés et en précurseurs d'arômes caroténoïdiques. International Viticulture & Enology Society (February 2022)

REGNARD.J-L et COUPEL-LEDRU.A. 2021. Comprendre et limiter les effets du déficit hydrique chez les plantes. Chapitre 8 du livre : Les productions fruitières à l'heure du changement climatique (coord : LEGAVE J.-M)

ROIGNANT, Jeanne. Biologie de développement du bois en réponse à des sollicitations mécaniques environnementales. 2018. Thèse de doctorat. Université Clermont Auvergne [2017-2020].

ROUSSELIN, Aurélie, SAUGE, Marie-Hélène, et JORDAN, Marie Odile. Dispositif de caractérisation simultanée de l'abondance de pucerons et de la croissance végétative d'arbres fruitiers. *Cahier des Techniques de l'INRA*, 2017, no 90, p. 1-6.

ROUSSELIN, Aurélie. *Contribution des pratiques culturales (irrigation et fertilisation azotée) à la gestion des populations de pucerons en verger fruitier: Cas des systèmes pêcher-puceron vert du pêcher (Prunus persica-Myzus persicae) et pommier-puceron cendre (Malus domestica-Dysaphis plantaginea)*. 2016. Thèse de doctorat. Université d'Avignon.

RIBAS-CARBO et al, 2005 Effects of water stress on respiration in soybean leaves. *Plant Physiology* 139: p466-473

SCHRADER, L. E., KAHN, C. B., FELICETTI, D. A., *et al.* Effects of high temperature and high solar irradiance on sunburn, quality, and skin pigments of apple fruit. In : *IX International Symposium on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems 903*. 2008. p. 1025-1039.

SCHRADER, Larry E. Scientific basis of a unique formulation for reducing sunburn of fruits. *HortScience*, 2011, vol. 46, no 1, p. 6-11.

SHANGGUAN, Z. P., SHAO, M. A., et DYCKMANS, Jens. Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat. *Environmental and experimental botany*, 2000, vol. 44, no 2, p. 141-149.

SIMMONEAU.T, HABIB.R, GOUTOULY.JP and HUGUET JG. 1993. Diurnal changes in stem diameter depend upon variation in water content: direct evidence in Peach trees. *Journal of Experimental Botany*, 44(260): 615-621.

SPERRY, John S. et TYREE, Melvin T. Mechanism of water stress-induced xylem embolism. *Plant physiology*, 1988, vol. 88, no 3, p. 581-587.

STEYN H. M. & Van Wyk A. E. 2021. — Taxonomic significance of trichomes in the genus *Acanthopsis* Harv. (Acanthaceae, tribe Acantheae). *Adansonia*, sér. 3, 43 (14): 163-176. <https://doi.org/10.5252/adansonia2021v43a14>. <http://adansonia.com/43/14>

STOCK, Manfred, GERSTENGARBE, Friedrich-W., KARTSCHALL, Thomas, *et al.* Reliability of climate change impact assessments for viticulture. In : *VII International Symposium on Grapevine Physiology and Biotechnology* 689. 2004. p. 29-40.

TAKY, Abdelilah. *Maitrise des excès d'eau hivernaux et de l'irrigation et leurs conséquences sur la productivité de la betterave sucrière dans le périmètre irrigué du Gharb (Maroc). Analyse expérimentale et modélisation*. 2008. Thèse de doctorat. AgroParisTech.

TASSIN, Claude. *Paysages végétaux du domaine méditerranéen : Bassin méditerranéen, Californie, Chili central, Afrique du Sud, Australie méridionale*. Nouvelle édition [en ligne]. Marseille : IRD Éditions, 2012 (généré le 09 août 2023). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/9781>>. ISBN : 9782709922890. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.9781>.

THOMSON, G., MCCASKILL, M., GOODWIN, I., *et al.* Potential impacts of rising global temperatures on Australia's pome fruit industry and adaptation strategies. *New Zealand journal of crop and horticultural science*, 2014, vol. 42, no 1, p. 21-30.

TOUSIGNANT, M. E. et DELORME, Michel. Connaître le fonctionnement de la plante pour mieux gérer son environnement. In : *Article paru dans Québec Vert (IQDHO). Adapté de Understanding Plant Growth: A Review of the Basics. Conférence présentée lors de l'Ohio International Short Course*. 2005.

TRON, Gérard, ISBÉRIE, Carole, et CHOL, Pierre. *La tensiométrie pour piloter les irrigations: une gestion raisonnée de la ressource en eau*. Educagri éditions, 2000.

UBAN.L, FABRET.C, BARTHELEMY.L. 1994. Interpreting changes in stem diameter in rose plants. *Physiologia Plantarum*, 92:668-674.

VANNIERE, H. "Utilización de las variaciones micrométricas de los diámetros de tallos y frutos de clementinos para el pilotaje de las irrigaciones." *Fruits*, Numéro spécial Agrumes 1992, p. 219-227.

VAN LEEUWEN, Cornelis et DARRIET, Philippe. The impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal of Wine Economics*, 2016, vol. 11, no 1, p. 150-167.

VAN LEEUWEN, Cornelis, DESTrac-IRVINE, Agnès, DE RESSEGUIER, Laure, *et al.* Phénologie: suivez l'horloge interne de la vigne: Langue originale de l'article: français. *IVES Technical Reviews, vine and wine*, 2019.

VIALET-CHABRAND, Silvère. Modélisation des variations journalières de la conductance stomatique : apport d'une approche dynamique et conséquences sur l'efficacité intrinsèque d'utilisation de l'eau chez le chêne. Thèse. Septembre 2013.

WESTGEEST.A.J, DAUZAT.M, SIMMONNEAU.T, PANTIN.F. 2023. Leaf starch metabolism sets the phase of stomatal rhythm. *The Plant Cell*, koad158, <https://doi.org/10.1093/plcell/koad158>

WITTLING C, RUELLE P. (coord.), 2022. Guide pratique de l'irrigation (4e éd.), Versailles, Edition Quae, 352 p.,

EL YAACOUBI, Adnane, MALAGI, Gustavo, OUKABLI, Ahmed, *et al.* Global warming impact on floral phenology of fruit trees species in Mediterranean region. *Scientia Horticulturae*, 2014, vol. 180, p. 243-253.

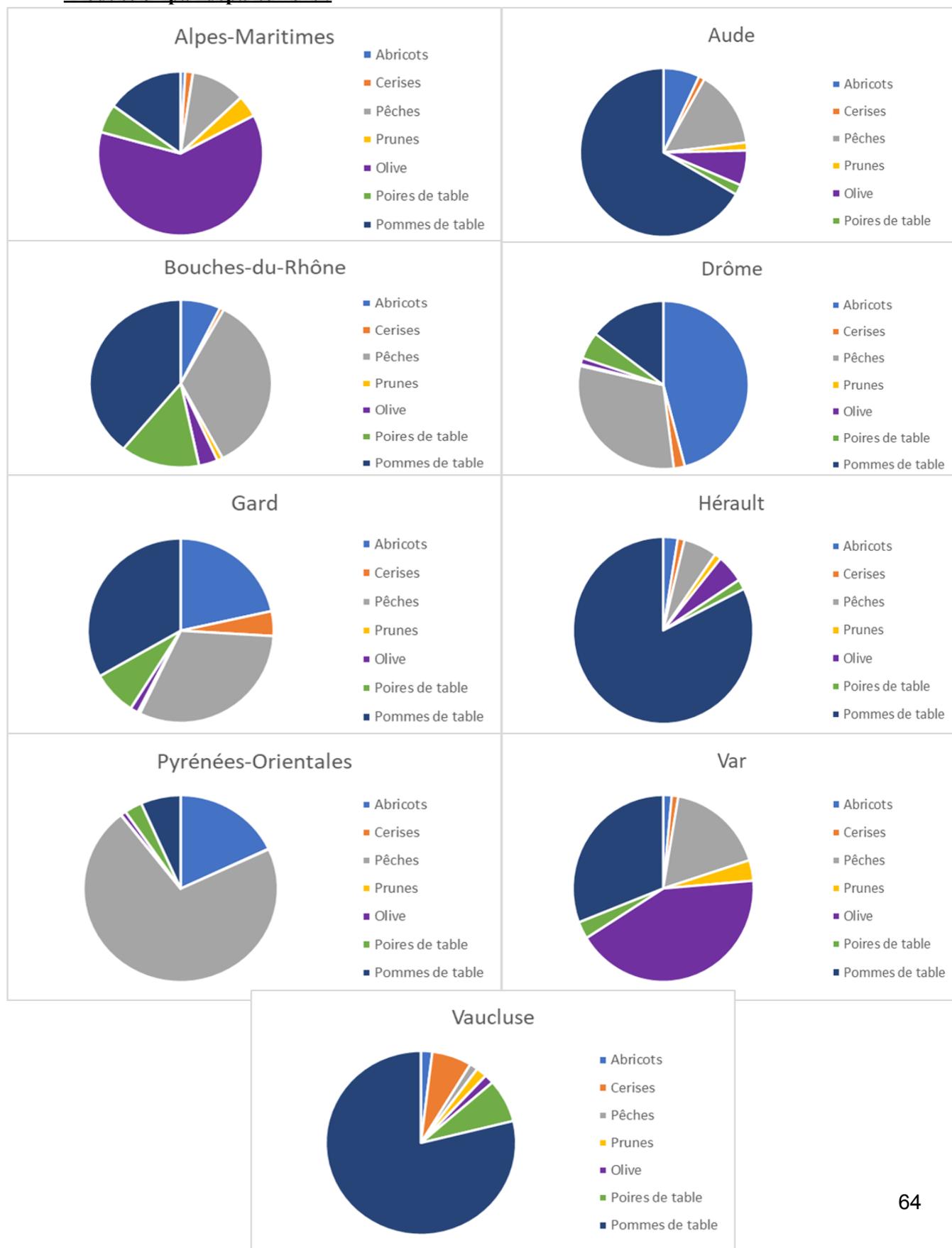
YUE, De, GOSSELIN, André, et DESJARDINS, Yves. Effects of forced ventilation at different relative humidities on growth, photosynthesis and transpiration of geranium plantlets in vitro. *Canadian Journal of Plant Science*, 1993, vol. 73, no 1, p. 249-256.

ZAMBONI, M. et IACONO, Francesco. Etude des variations du potentiel osmotique et de l'élasticité cellulaire dans des vignes soumises a un stress hydrique (1). *OENO One*, 1988, vol. 22, no 4, p. 241-249.

Annexes

Annexe 1 : Présentation de la part (en %) des fruits produits dans la zone d'étude (climat méditerranéen - limites départementale) pour la production française.

Production par département :



Annexe 2 : « GREC-SUD – Le Climat de Demain En Provence-Alpes-Côte d’Azur ».
GREC-SUD.

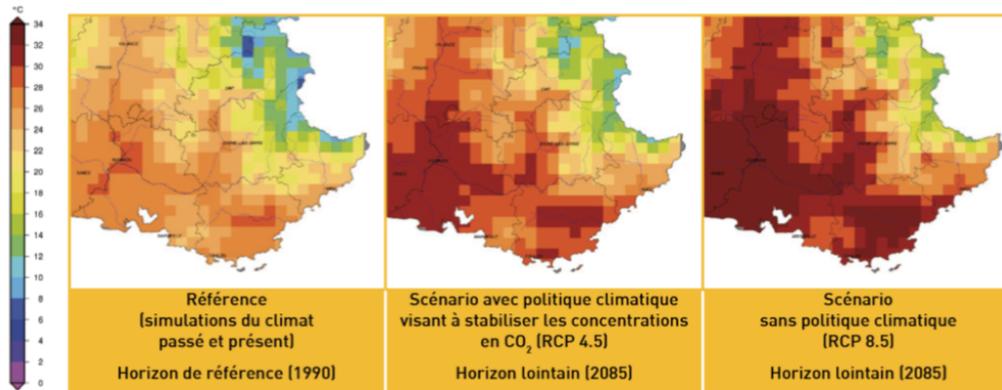


Figure 23. Evolution de la température maximale de l'air au cours de l'été (juin à août) en région PACA : exemple de la moyenne estivale de température maximale quotidienne (source : Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL / www.drias-climat.fr)

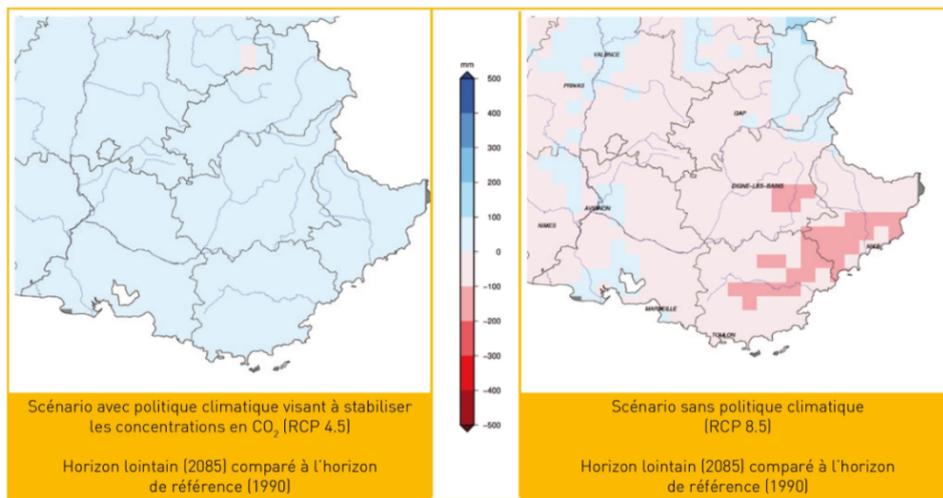


Figure 26. Anomalie du cumul de pluie moyen annuel des modèles Euro-Cordex (quantile 50 = médiane) en région PACA (source : Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL / www.drias-climat.fr)



Figure 27. Evolution du climat pour 4 villes de PACA selon 3 scénarios RCP et 2 horizons futurs (2050 et 2100) (source : Joël Guiot, CNRS / illustration : Philippe Rossello, GeographR)

Annexe 3 : Tableau de données sur l'irrigation par espèce selon la chambre d'agriculture de la région Provence Alpes-Côte-D'Azur

Irrigation	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total
Pêche	0	0	0	15	65	160	185	80	15	0	0	0	520
pommier	0	0	0	30	80	150	205	150	50	0	0	0	665
poirier	0	0	0	30	80	150	205	150	50	0	0	0	665
cerisier	0	0	0	0	25	75	80	60	20	0	0	0	260
abricotier	0	0	0	0	30	115	100	60	20	0	0	0	325
prunier	0	0	0	30	95	180	205	115	50	0	0	0	675
amandier	0	0	0	20	55	100	120	65	0	0	0	0	360
raisin (table)	0	0	0	0	5	65	100	40	0	0	0	0	210
raisin (de cuve)	0	0	0	0	0	35	80	25	0	0	0	0	140
olivier	0	0	0	0	5	45	80	70	15	0	0	0	215
Moyenne précipitation (chambre d'agriculture)	50	30	35	68	59	38	27	38	110	93	78	42	668

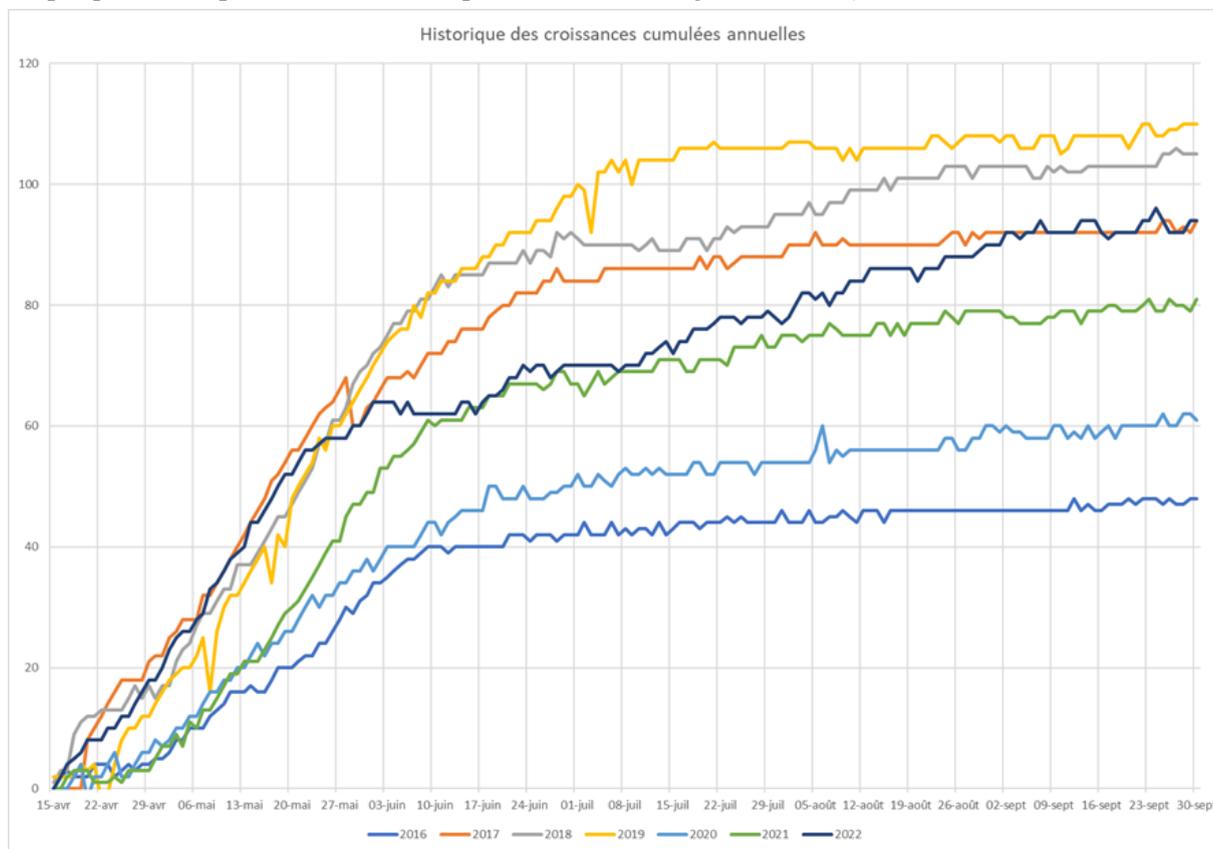
Figure 66 : Irrigation annuelle conseillée par la chambre d'agriculture pour une année sèche avec une RU égale à 100mm/m dans les alentours d'Avignons

Espèce	Consommation annuelle conseillée
Pêche	1188
pommier	1333
poirier	1333
cerisier	928
abricotier	993
prunier	1343
amandier	1028
raisin (table)	878
raisin (de cuve)	808
olivier	883

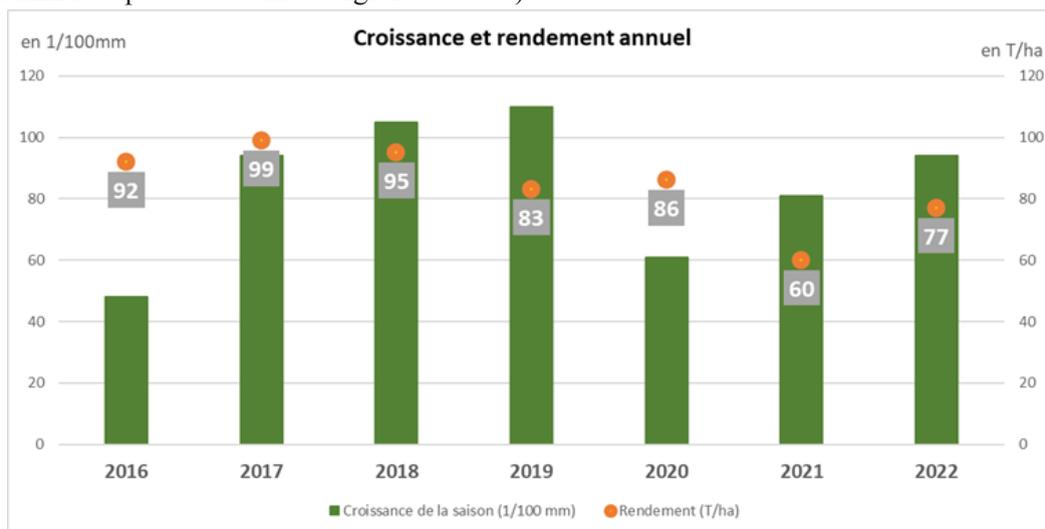
Figure 67 : Besoin annuelle par espèce D'après la chambre d'agriculture

Annexe 4 : Variabilité de croissance et de rendement entre différentes années sur une parcelle de pommier de la variété Rosy Glow.

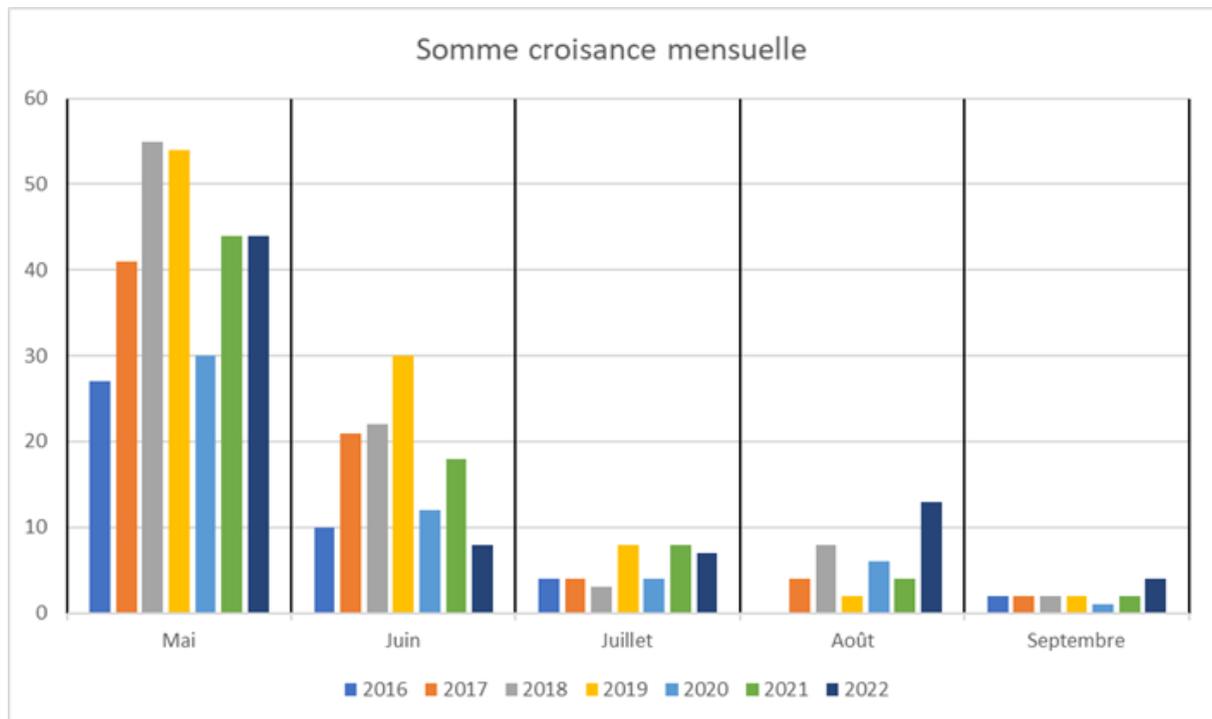
Différence de croissance secondaire cumulée de 2016 à 2022. Observé par Pepista (Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Agroressources)



Comparaison des croissance et des rendement des années 2016 à 2022 (Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Agroressources).



Comparaison des cumuls des croissances mensuels observé de 2016 à 2022. (Source : Graphique réalisé par Léo BAILLY d'après des données Agroressources).



Il est important de retenir ici la grande disparité des cumuls de croissance et la non correspondance croissance /rendement.

Annexe 5 : Justification et explication du choix des périodes étudiées de les graphiques de la figure 32 page31.

Les 4 graphiques permettent de comparer l'amplitude moyenne des fruitiers observés pour une journée ayant recensé de fortes températures. Puisque l'ensemble de ces vergers ne sont pas implantés chez le même agriculteur, il nous était impossible de faire l'étude sur une période identique (variante climatique possible dû à la géographie changeante entre les agriculteurs). De ce fait, nous avons choisi d'établir la comparaison par la similarité du climat. Plusieurs critères sont entrés en compte dans le choix de la période étudiée, il fallait qu'elle soit :

- En juillet 2022
- 8 jours de chaleur consécutive (nous avons considéré comme période de forte chaleur plusieurs jours ayant enregistré à plusieurs heures une température supérieur à 35°C)
- Pas de pluie 10 jours avant

Remarque : la sélection ne contient pas de période avec pluies, mais les études étant réalisées sur des parcelles agricoles à but économique et non expérimentale les irrigations ont perduré.

- Pas d'épisode venteux virulent
- Aucun manque de données sur la période concernée
- Etude menée sur des parcelles préalablement validée par l'équipe d'Agroressources

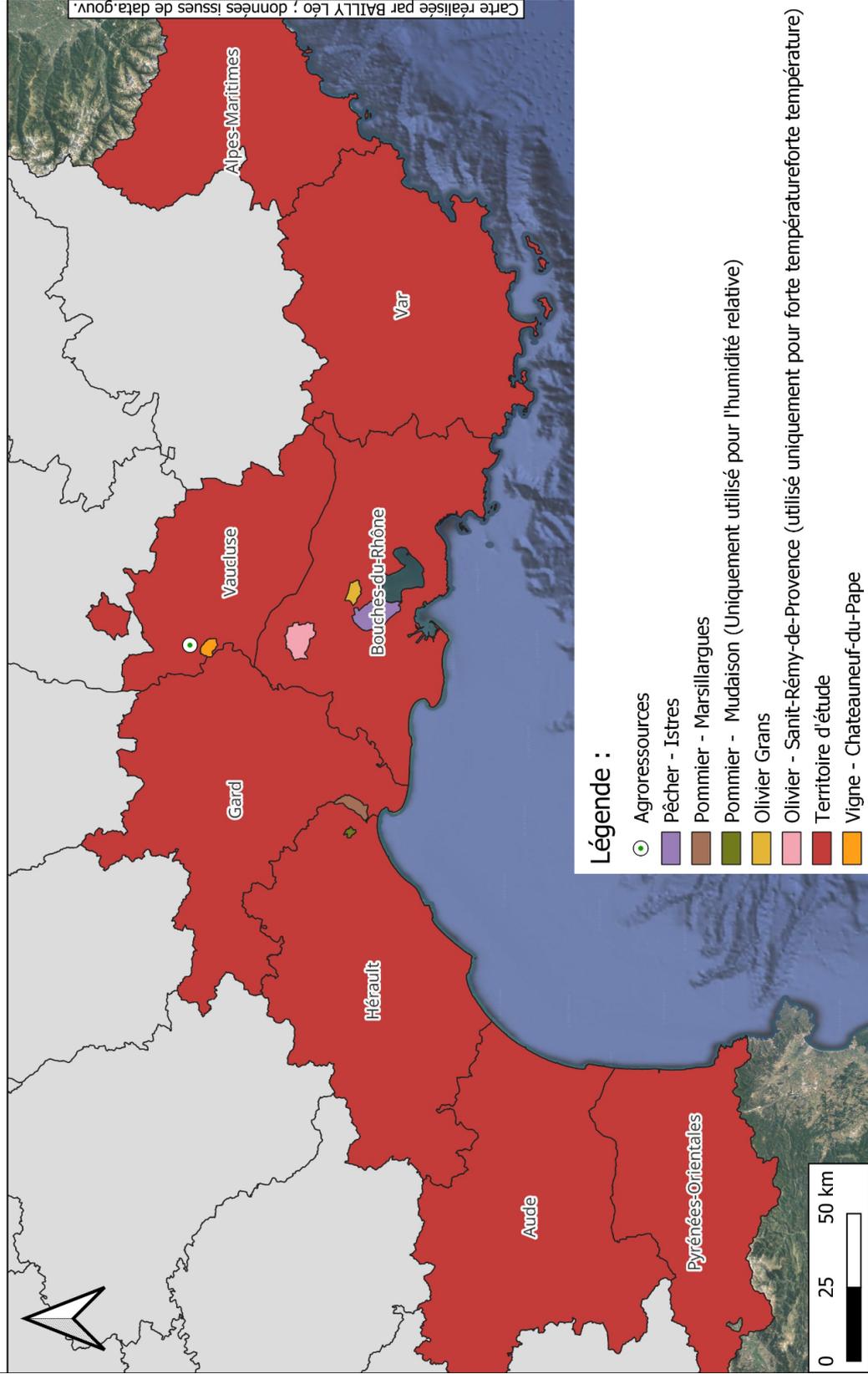
Une fois ces critères remplis, nous avons choisi des périodes où les moyennes des mesures qui nous sont disponibles avec les stations météo d'Agroressources sont semblables. (la sélection Pepista est visible dans l'annexe suivante)

Avec l'ensemble de ces critères 3 périodes ont été définies

Remarque : Les oliviers et les pêchers ont pour référence la même station météo

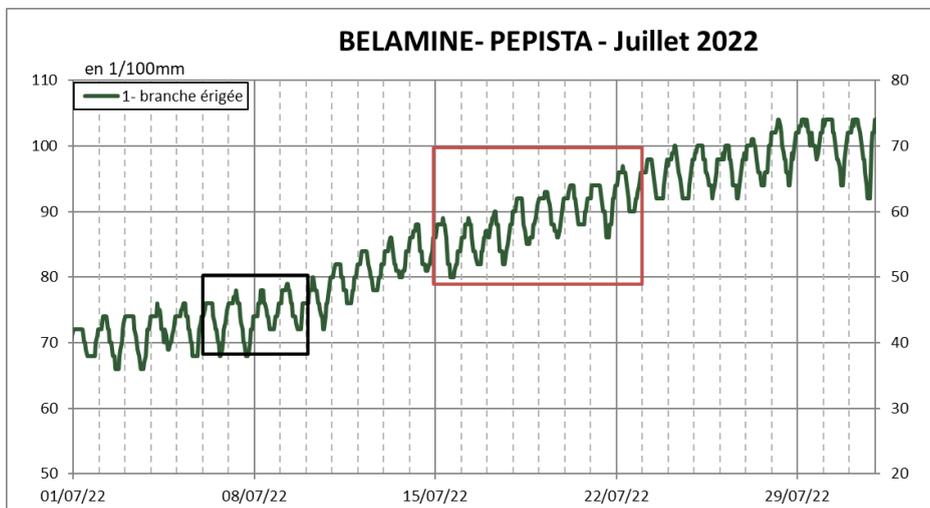
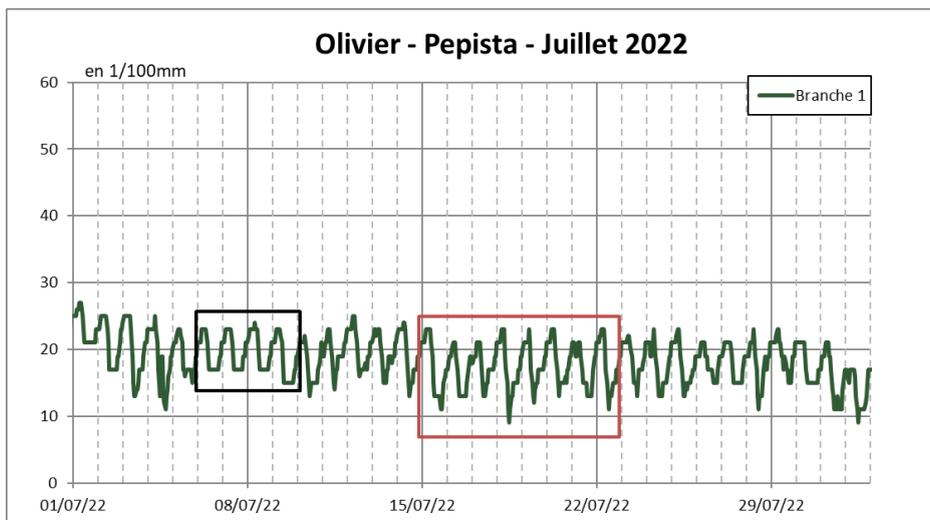
Olivier - Pecher										
	moy Température [°C]	max Température [°C]	min Température [°C]	moy Déficit de Pression de vapeur [kPa]	min Déficit de Pression de vapeur [kPa]	moy Humidité Relative [%]	max Humidité Relative [%]	min Humidité Relative [%]	Somme Précipitations [mm]	ensoleillement panneau (mV)
Moyenne	28	29	27	2	2	62	66	58	0	4292
Max	40	41	40	6	5	100	100	100	0	9380
Min	15	15	14	0	0	19	21	16	0	0
Vigne										
	moy Température [°C]	max Température [°C]	min Température [°C]	moy Déficit de Pression de vapeur [kPa]	min Déficit de Pression de vapeur [kPa]	moy Humidité Relative [%]	max Humidité Relative [%]	min Humidité Relative [%]	Somme Précipitations [mm]	ensoleillement panneau (mV)
Moyenne	29	30	29	2	2	46	48	44	0	4839
Max	38	39	37	5	5	98	99	97	0	9878
Min	22	23	21	0	0	13	14	12	0	0
Pommier										
	moy Température [°C]	max Température [°C]	min Température [°C]	moy Déficit de Pression de vapeur [kPa]	min Déficit de Pression de vapeur [kPa]	moy Humidité Relative [%]	max Humidité Relative [%]	min Humidité Relative [%]	Somme Précipitations [mm]	ensoleillement panneau (mV)
Moyenne	28	29	28	2	2	60	64	57	0	4829
Max	40	41	39	6	5	100	100	100	0	9475
Min	18	18	17	0	0	20	22	17	0	0

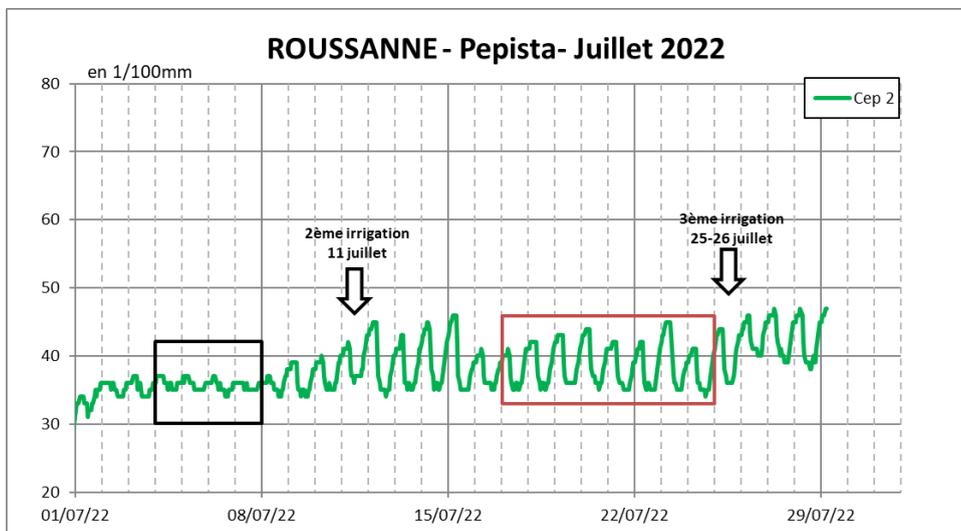
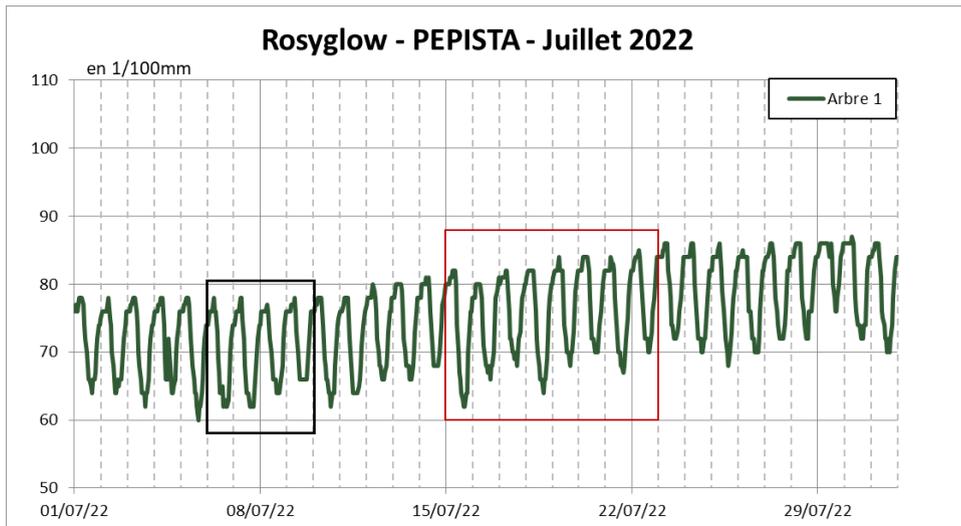
Répartition géographique des cultures étudiées au sein du territoire d'étude



Annexe 6 : Justification et explication du choix des périodes étudiées de les graphiques de la figure 42 page 36 :

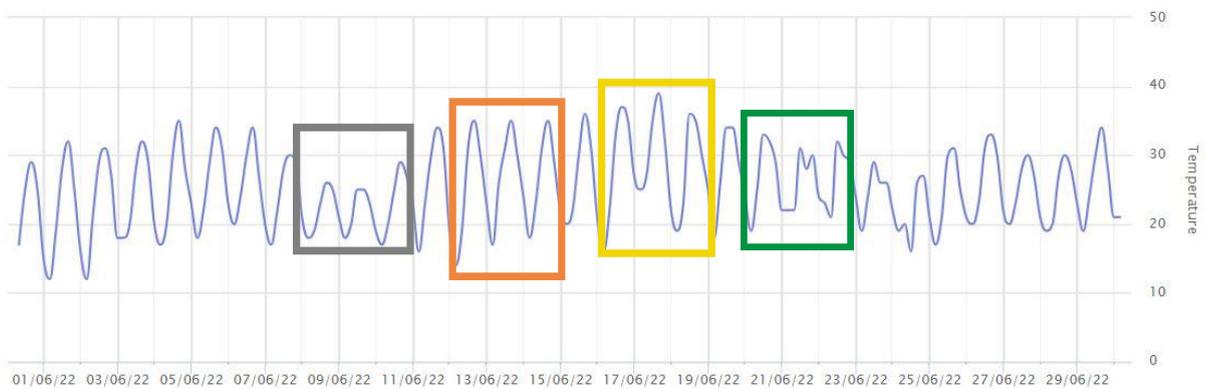
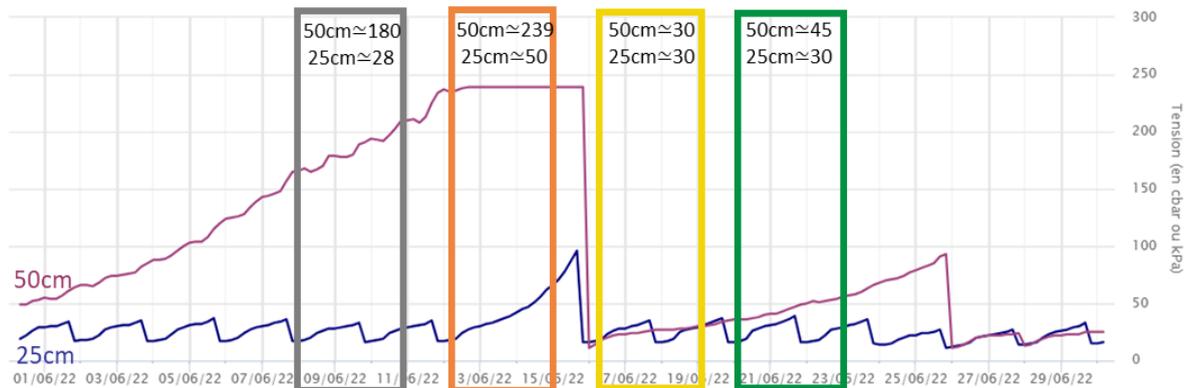
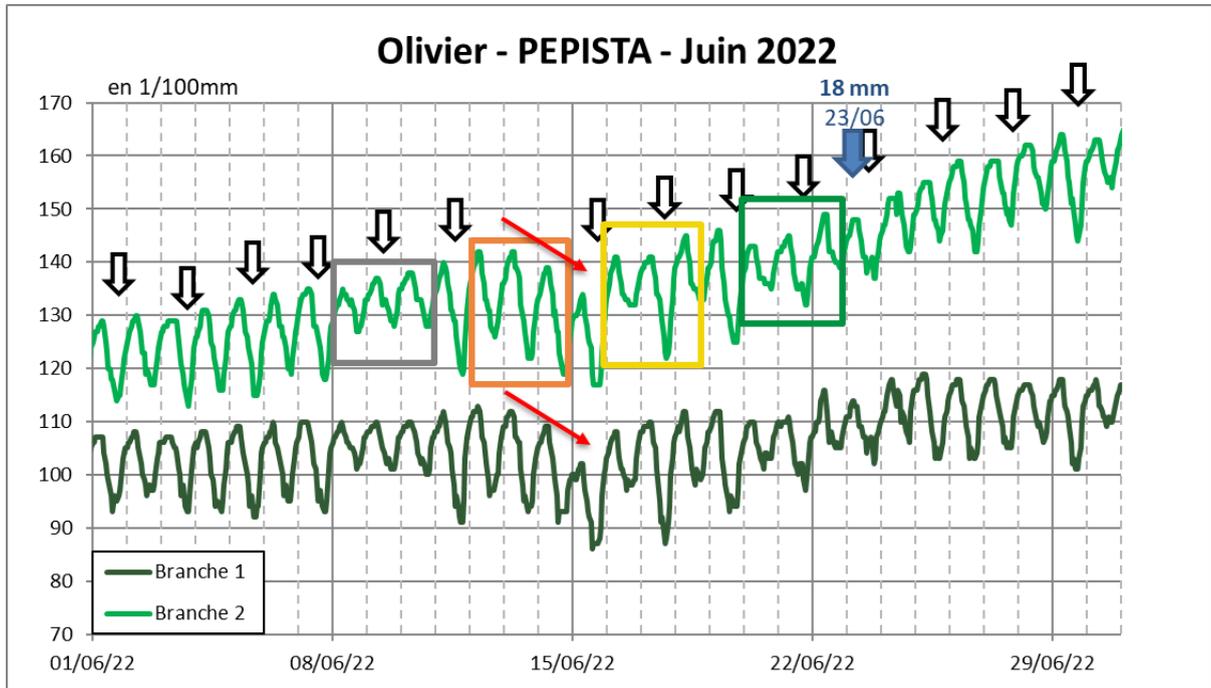
Afin de comparer les amplitudes du pommier, du pêcher, de l'olivier et de la vigne lors d'épisodes venteux, il a fallu sélectionner une période pour chacune des cultures. La méthode utilisée est plus simple que la comparaison des températures. En effet, en juillet 2022 un épisode de vent a touché presque simultanément les 4 cultures (1 jour d'intervall entre la vigne et les autres parcelles étudiées). Voici ci-dessous la sélection Pepista. Les encadrés noir correspondent au vent et les encadrés orange aux épisodes de fortes chaleur évoquées précédemment.





Remarque pour l'irrigation de Roussanne : Les tensions observées sur la parcelle au 17 juillet était similaire voir supérieure à celles observées post irrigation (11 juillet). Nous pouvons alors supposer que celle-ci n'a que peu influencé l'étude des impacts de forte chaleur.

Annexe 7 : Visualisation des périodes concernées par l'étude page 40 figure 48, 49, et 50, sur Pepista et sonde tensiométrique lié au Monitor



Annexe 8 : Le Changement climatique récent et futur sur l'arc péri-méditerranéen ; Décembre 2008 ; François LELIEVRE, Jean-Baptiste FINOT, Sylvain SATGER

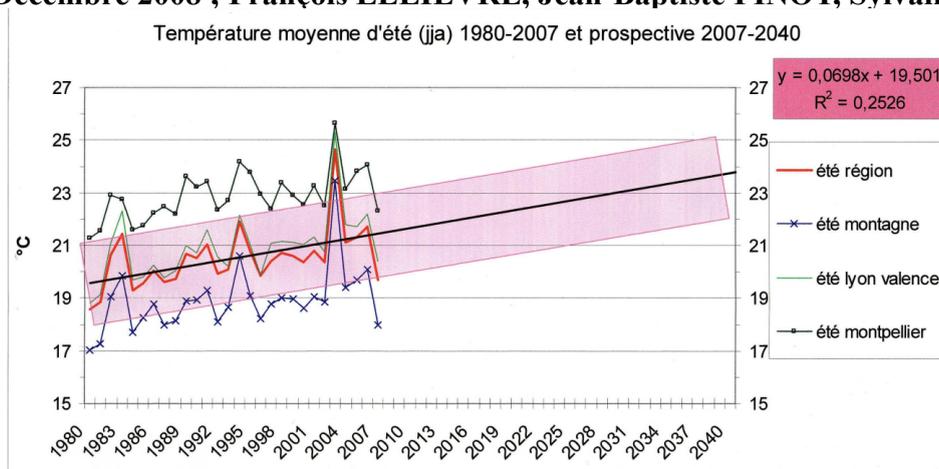


Fig. 30. Température moyenne d'été (région, stations de montagne, Montpellier et Lyon-Valence), période 1980-2007 et prospective régionale pour 2007-2040 établie par prolongation de la courbe de tendance.

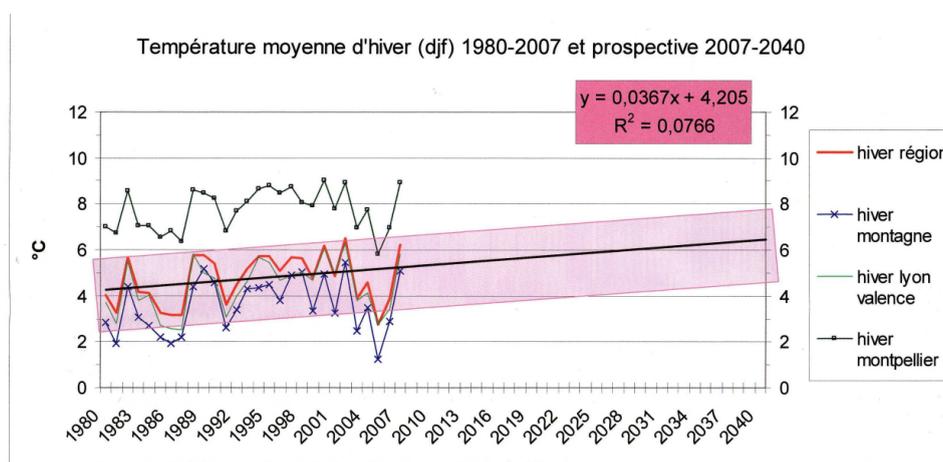


Fig. 31. Température moyenne d'hiver (région, stations de montagne, Montpellier et Lyon-Valence), période 1980-2007 et prospective régionale pour 2007-2040 établie par prolongation de la courbe de tendance.

All Models mean jja 2046-2065 Ref 1961-1990

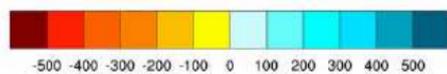
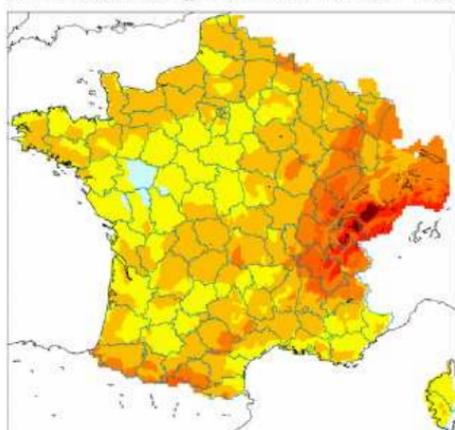


Fig. 33. Moyenne multi-modèles des anomalies de précipitation (mm/an) pour la période estivale (juin-juillet-août (JJA)) couvrant 2046-2065 par rapport à la climatologie 1961-1990. Les modèles sont ceux du GIEC ainsi que les 4 simulations ARPEGE V3+ CERFACS.

All Models mean djf 2046-2065 Ref 1961-1990

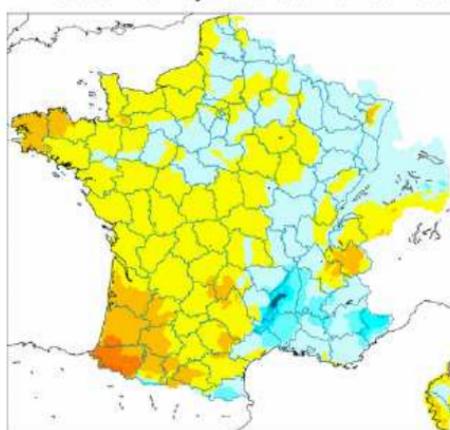


Fig. 34. Moyenne multi-modèles des anomalies de précipitation (mm/an) pour la période hivernale (décembre-janvier-février (DJF)) de la période 2046-2065 par rapport à la climatologie 1961-1990. Les modèles sont ceux du GIEC ainsi que les 4 simulations ARPEGE V3+ CERFACS.

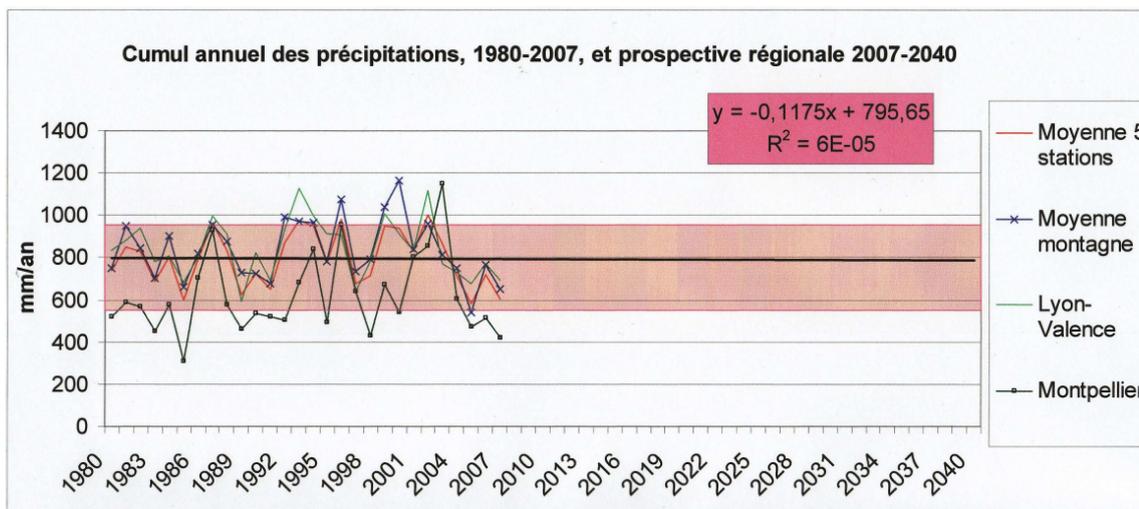


Fig. 35. Cumul annuel des précipitations pour la région, la moyenne Lyon-Valence, les stations de moyenne montagne et Montpellier, période 1980-2007 et prospective 2007-2040

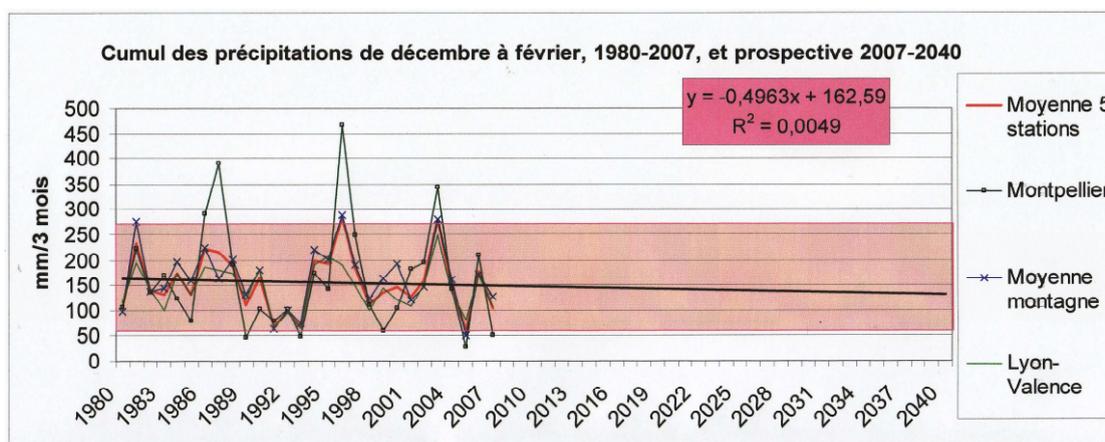


Fig. 36. Cumul des précipitations de décembre à février pour la région, la moyenne Lyon-Valence, les stations de moyenne montagne et Montpellier, période 1980-2007 et prospective 2007-2040

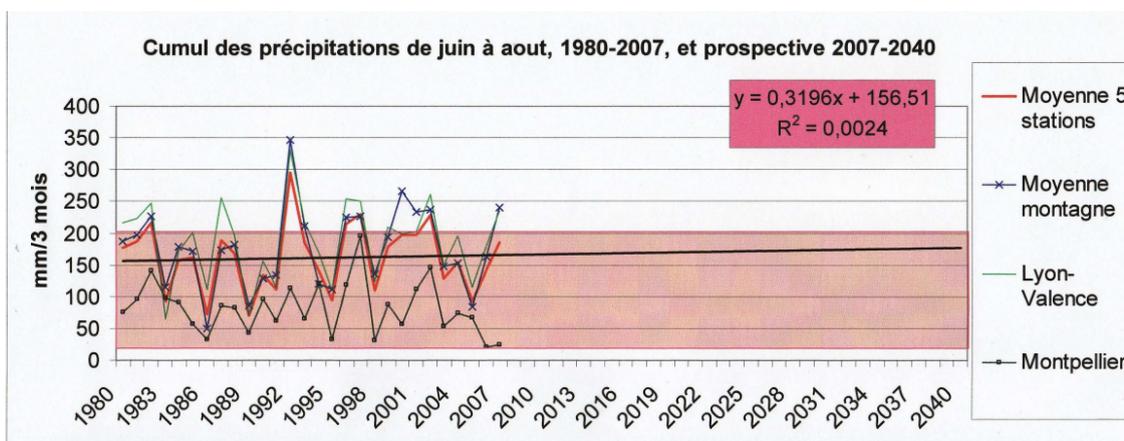
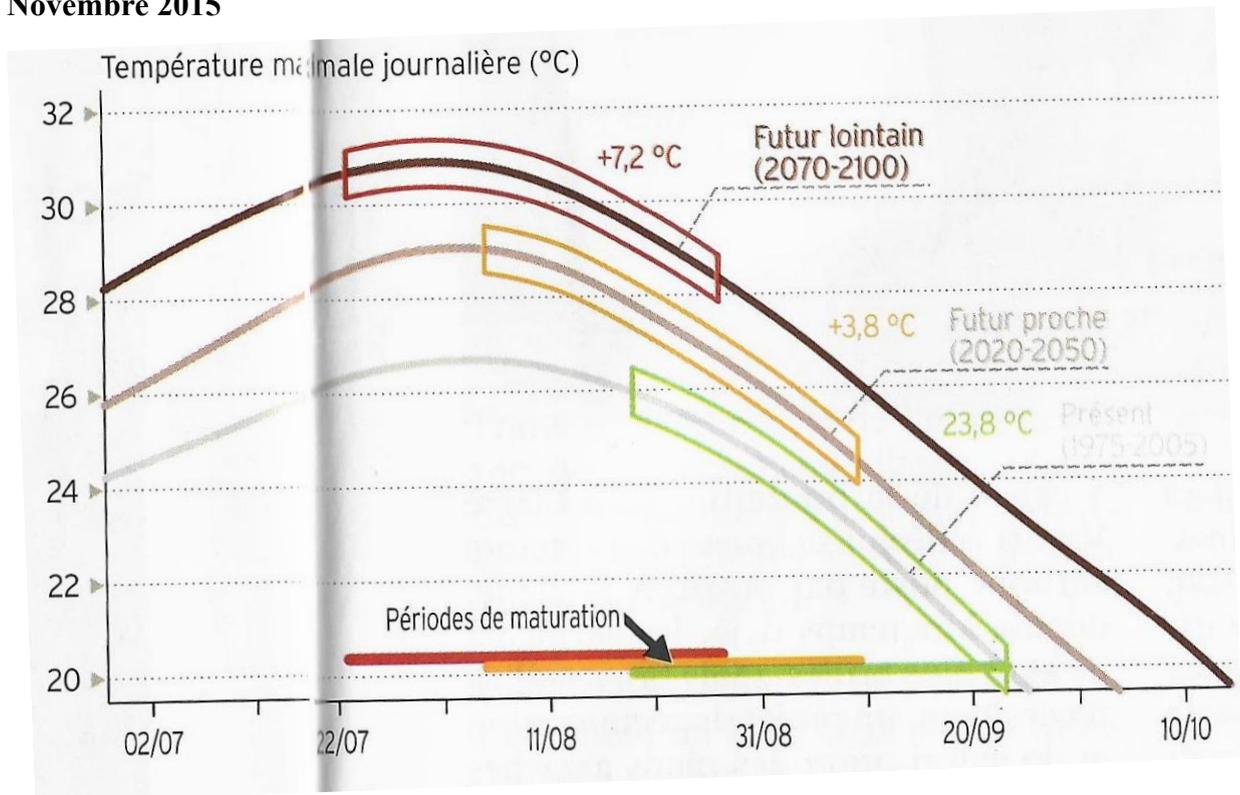


Fig. 37. Cumul des précipitations de juin à août pour la région, la moyenne Lyon-Valence, les stations de moyenne montagne et Montpellier, période 1980-2007 et prospective 2007-2040

Annexe 9 : Evolution de la température à laquelle s'effectuera la maturation des baies de raisins. Source : E.DUCHENE ; Paru dans la revue : Réussir Vigne, numéro 223, en Novembre 2015



Annexe 10 : Tolérance au stress hydrique de quelques variétés de pommier en culture dans le moyen atlas. Par Mohamed El Kadi(1,2), Rachid Razouk(1), Jamal Charafi(1) et Saïd Bouda(2). Publié le 13 mai 2020 par Bahri

Tableau 1. Ratios entre les valeurs enregistrées sous déficit hydrique et celles relevées sous irrigation complète pour les traits de production et de croissance végétative des variétés de pommier étudiées

Variété	Rendement	Charge arbre	Poids du fruit	Surface foliaire	Longueur pousse	Densité feuillage
Burki gala	0,90	1,04	0,90	0,98	0,94	0,95
Royal gala	0,88	1,12	0,99	0,76**	0,94	0,95
Golden smoothie	0,58**	0,76*	0,73*	0,80**	0,92**	0,95
Golden delicious	0,50*	0,74*	0,67**	0,50**	0,74	0,92
Fuji zen	0,49*	0,71*	0,69*	0,74**	0,69	0,96
Jeromine	0,45**	0,52**	0,79*	0,92**	0,92**	0,96
Galaval	0,37*	0,74*	0,99	0,49**	0,70	0,97
Ozanne golden	0,32*	0,41*	0,77**	0,77	0,87	0,83
Brookfield	0,29**	0,42*	0,67*	0,97*	0,88**	0,83
Washinton spur	0,27**	0,20**	0,93	0,44**	0,82*	0,92
Golden reinders	0,07**	0,12**	0,56**	0,32**	0,76*	0,82

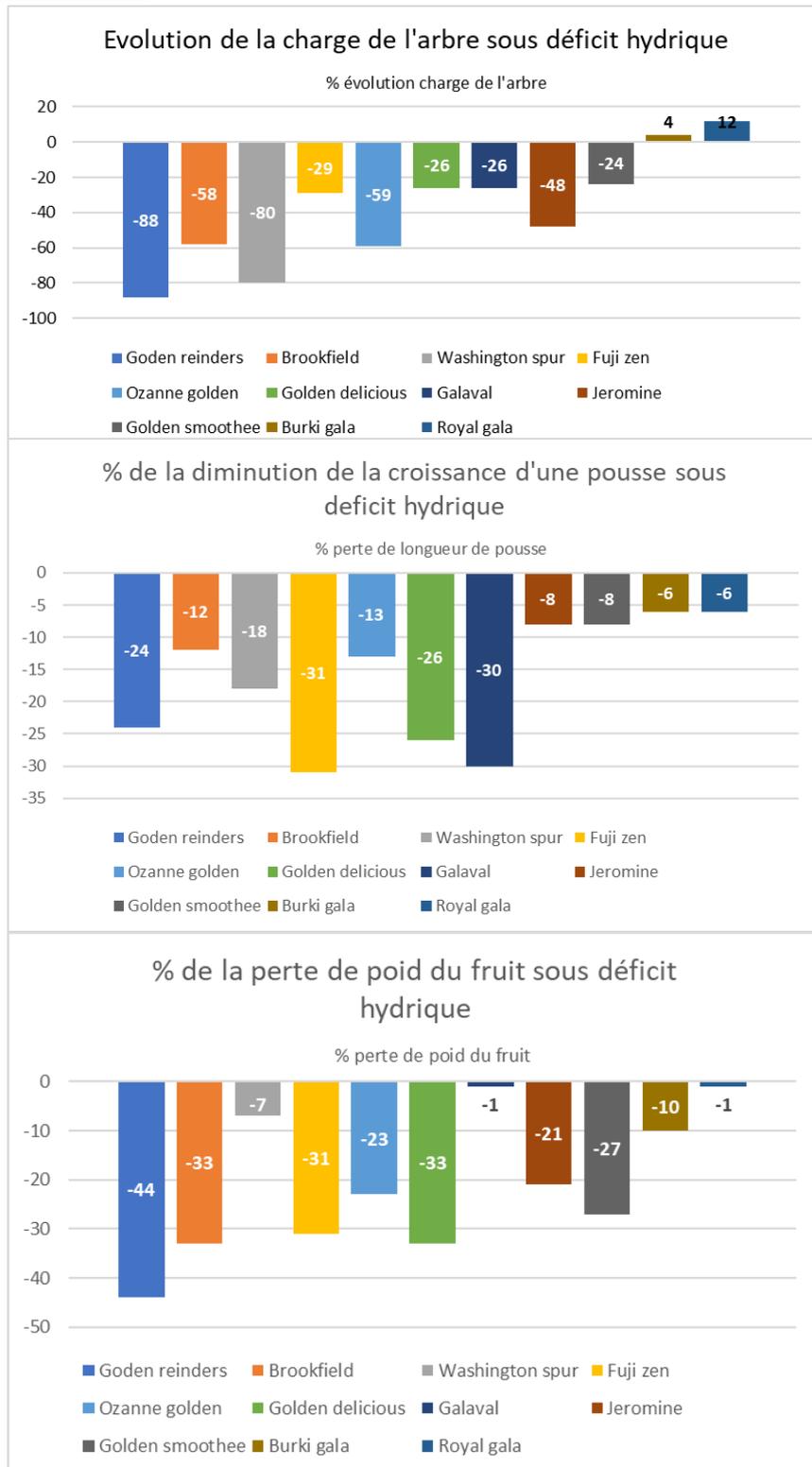
*, ** : différence significative à 1 pour $p \leq 0.05$ ou 0.01 , respectivement, par ANOVA suivant le test de Student-Newman et Keuls. Les valeurs non marquées sont significativement égales à 1

Tableau 2. Ratios entre les valeurs enregistrées sous déficit hydrique et celles relevées sous irrigation complète pour les traits physiologiques des variétés de pommier étudiées

	Chlorophylle a	Chlorophylle b	Conductance stomatique	Densité stomatique	Proline foliaire	Cires cuticulaires
Burki Gala	0,98	0,83	0,54**	0,78	3,17**	2,38*
Royal Gala	0,53	1,33	0,85	0,86	1,81	2,40*
Golden smoothie	0,72	0,58	0,67*	0,93	2,38*	3,26
Golden delicious	1,05	0,37	0,77*	0,75**	1,70	6,40*
Fuji zen	0,65	1,00	0,65*	0,90	1,94**	3,78*
Jeromine	0,87	0,60	0,76*	0,78	2,71*	3,50*
Galaval	1,00	1,00	0,46*	0,77**	3,27*	2,27*
Ozanne golden	0,80	0,40	0,87	0,82	2,29*	1,92*
Brookfield	0,95	0,87	0,74	0,67**	2,79**	2,08
Washinton spur	1,00	1,00	0,68	0,86	2,50**	3,78**
Golden reinders	0,80	0,65	0,71	0,87	1,60	3,10*

*, ** : différence significative à 1 pour $p \leq 0.05$ ou 0.01 , respectivement, par ANOVA suivant le test de Student-Newman et Keuls. Les valeurs non marquées sont significativement égales à 1

Données issues de l'étude



Annexe 11 : Influence des porte greffe sur la tolérance à la sécheresse

Source : Jean-Luc REGNARD et Aude COUPEL-LEDRU

Tableau 8.2. Principales aptitudes agronomiques (pour les caractéristiques du sol) de quelques porte-greffes des arbres fruitiers à noyau : abricotier (ABR), prunier (PRU), pêcher (PEC) et amandier (AMA). Synthèse d'après des données du Ctifl et de INRAE.

Porte-greffe	Porte-greffe par espèce	Tolérance au sol sec ⁽¹⁾	Tolérance à l'asphyxie ⁽¹⁾	Tolérance à la chlorose ⁽¹⁾	Généalogie
Montclar® Chanturgue	PEC, ABR ⁽²⁾	+	+ / ++	+ / ++	<i>Prunus persica</i>
Rubira	PEC, ABR	+	+ / ++	+ / ++	<i>Prunus persica</i>
GF 677	PEC, AMA	+++	+	+++	<i>Prunus persica</i> × <i>P. dulcis</i>
Garnem	PEC, AMA	+++	+	+++	<i>Prunus persica</i> × <i>P. dulcis</i>
Cadaman® Avimag	PEC, AMA	++ / +++	++	+++	<i>Prunus persica</i> × <i>P. davidiana</i>
Manicot GF 1236	ABR	++	+	++	<i>Prunus armeniaca</i>
Torinel® Avifel	ABR	0 / +	+++	+++	<i>Prunus domestica</i> × <i>P. spinosa</i>
Julior® Ferdor	PEC	0 / +	+++	++	<i>Prunus domestica</i>
Jaspi® Fereley	PEC, PRU	0 / +	+++	+++	(<i>Prunus salicina</i> × <i>P. cerasifera</i>) × <i>P. spinosa</i>
Mariana GF 8-1	PRU	++	++	+ / ++	<i>Prunus mariana</i>
Myrobolan P 1254	PRU, ABR	0 / +	+++	+++	<i>Prunus cerasifera</i>
Myran® Yumir	PEC, AMA	+ / ++	+++	+	(<i>P. cerasifera</i> × <i>P. salicina</i>) × <i>P. persica</i>
Ishtara® Ferciana	Polyvalent	+ / ++	++	++	(<i>P. cerasifera</i> × <i>P. salicina</i>) × (<i>P. cerasifera</i> × <i>P. persica</i>)
Prunier GF 43	PEC	0 / +	+++	++	<i>Prunus domestica</i>
Citation® Zaipime	Polyvalent	0 / +	++ / +++	++	<i>Prunus salicina</i> × <i>P. persica</i>
Rootpac® Replantpac	PEC, PRU	NA	+++	+++	<i>Prunus cerasifera</i> × <i>P. dulcis</i>

1. Tolérance ou résistance : 0, très faible ; +, faible ; ++, moyenne ; +++, forte.

2. ABR, abricotier ; AMA, amandier ; PEC, pêcher ; PRU, prunier.