



**HAL**  
open science

# Du capteur au site web, développement d'une plateforme d'étude des changements climatiques dans un vignoble

Alexis Fribault, Fabrice Vinatier

## ► To cite this version:

Alexis Fribault, Fabrice Vinatier. Du capteur au site web, développement d'une plateforme d'étude des changements climatiques dans un vignoble. *Ecologie, Environnement*. 2022. hal-04808823

**HAL Id: hal-04808823**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04808823v1>**

Submitted on 28 Nov 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License



Ecole Supérieure d'Agricultures d'Angers  
55 rue Rabelais  
49007 Angers



Institut Agro de Montpellier  
2 place Pierre Viala  
34060 Montpellier Cedex 2

## **Du capteur au site web, développement d'une plateforme d'étude des changements climatiques dans un vignoble**

### **Mémoire de Fin d'Etudes**

Promotion 2017  
Octobre 2022

FRIBAULT Alexis  
Elève-Ingénieur ESA  
CANNAVACCIUOLO Mario

## Notice bibliographique

**Auteur :** FRIBAULT Alexis

**Promotion :** 2017      **Patron de mémoire :** CANNAVACCIULO Mario

**Mots clés :** Viticulture connecté, Biodiversité, Deep-learning, Changements climatique

<b>Résumé d'auteur</b>	
<b>But de l'étude</b>	<p>Le projet "Monitoring Mediterranean Agroecosystem from field to landscape" (MOMAC) réunit plusieurs UMR autour des thématiques du changement climatique. Ce projet, pluriannuel, veut étudier les effets liés aux modifications des pratiques agricoles, dans le but de s'adapter aux évolutions du climat, à l'échelle de la parcelle mais également du paysage. L'étude prend part au sein de l'un des axes de travail de ce projet consistant à développer une plateforme d'études des changements climatiques et de ces impacts sur la viticulture et la diversité floristique du milieu associé, l'inter-rang. Il s'agit de réaliser une preuve de concept sur la réalisation d'un observatoire colocalisé de la vigne et de la diversité floristique.</p>
<b>Méthode techniques</b> et	<p>Différents capteurs de variables météorologiques et édaphiques sont utilisés afin de mesurer, au plus près de la culture, les variations climatiques. Des caméras ont été positionnées afin de capturer le développement végétatif et physiologique de la vigne ainsi que l'évolution de la diversité florale du sol. Ces données seront ensuite traitées par différents algorithmes d'intelligence artificielle. Un algorithme de reconnaissance des baies et de mesure des volumes à partir de la photographie d'une grappe ainsi qu'un algorithme d'identification des espèces végétales au sein d'un quadra sur une image du sol à partir de la base de données PlantNet. Enfin, la communication des résultats au sein d'une application R-Shiny interactive représente l'étape finale de cette étude.</p>
<b>Résultats</b>	<p>Les données climatiques obtenues nous ont permises d'observer deux épisodes climatiques important : les chaleurs extrêmes et les fortes précipitations. Ces évènements ont été corrélés à l'évolution de la croissance de la vigne. Les algorithmes cités ont pu être testé avec des données en temps réel des grappes et du sol. Les résultats se sont montrés concluants quant à l'utilisation de l'algorithme mais les données obtenues n'ont pas été exploitables faute de références.</p>
<b>Conclusion</b>	<p>Cette étude a permis de réaliser la preuve du concept d'un tel observatoire. En effet, les données récoltées ont pu être traitées par les différents algorithmes et pourront être intégrées à un plan d'expérimentation. Nous avons également pu observer des corrélations entre les évènements climatiques et notre matériel végétal au travers du diamètre des rameaux.</p>

## Bibliographic records

**Author:** FRIBAULT Alexis

**Promotion:** 2017

**Supervisor:** CANNAVACCIULO Mario

**Key words:** Smart viticulture, Biodiversity, Deep-learning, Climate change

<b>Records</b>	
<b>Study's purpose</b>	<p>The "Monitoring Mediterranean Agroecosystem from field to landscape" (MOMAC) project brings together several combined research units (UMRs) to study climate change. This multi-annual project aims to study the effects of changes in agricultural practices, with the aim of adapting to climate change, at both the field and landscape levels. The present study is part of one of the work areas of this project, which consists of developing a platform for studying climate change and its impacts on viticulture and the floral diversity of the associated environment, the inter-row. The aim is to carry out a proof of concept on the creation of a co-located observatory for vines and floral diversity.</p>
<b>Methods techniques</b>	<p>Various sensors of meteorological and edaphic variables are used to measure climatic variations as close as possible to the crop. Cameras have been positioned to capture the vegetative and physiological development of the vine as well as the evolution of the floral diversity of the soil. This data will then be processed by various artificial intelligence algorithms. An algorithm for recognising berries and measuring volumes from a photograph of a bunch. An algorithm for identifying plant species within a quadra on a soil image from the PlantNet database. Finally, the communication of the results within an interactive R-Shiny application represents the final step of this study.</p>
<b>Results</b>	<p>The climatic data obtained allowed us to observe two important climatic episodes: extreme heat and heavy rainfall. These events were correlated with the evolution of the vine growth. The above-mentioned algorithms were tested with real-time data from the bunches and the soil. The results were conclusive as to the use of the algorithm, but the data obtained could not be exploited due to a lack of references.</p>
<b>Conclusion</b>	<p>This study made it possible to carry out the proof of concept of such an observatory. Indeed, the data collected could be processed by the different algorithms and could be integrated into an experimental plan. We were also able to observe correlations between climatic events and our plant material.</p>

## REMERCIEMENTS

## **Table des matières**

INTRODUCTION .....	1
I - CONTEXTE .....	2
A- Projet MOMAC.....	2
1. Description des organismes de recherche et UMR du projet .....	2
2. Le projet MOMAC .....	4
B- Etat de l'art .....	7
1. Changements climatiques .....	7
2. Physiologie de la vigne.....	12
3. Biodiversité végétale dans les vignes .....	17
4. Viticulture de précision .....	22
C- Problématisation .....	26
1. Hypothèses du sujet.....	26
2. Problématique générale .....	27
D- Identification de la mission personnelle.....	27
1. Instrumentation de La Gaillarde .....	28
2. Traitement des données obtenues .....	28
3. Présentation des résultats .....	28
II – MATERIEL ET METHODES .....	29
A- Description du site d'étude.....	29
1. Présentation de la parcelle .....	29
2. Le matériel végétal .....	30
B- Description du dispositif .....	30
1. Photographie.....	31
2. Terros 12.....	32
3. Dendrométrie .....	33
4. Hygrométrie et rayonnement.....	34
5. Station météo .....	35
C- Suivre des données .....	36
1. Stades phénologiques.....	36
2. Remplissage des baies .....	37
3. Suivi de l'état hydrique de la vigne et mesure des variables climatiques .....	38
4. Interprétation des données du sol .....	39
D- Chaîne de traitement de l'information.....	42
III – RESULTATS .....	43

A- Dynamiques phénologiques.....	43
1. Succession des stades du feuillage.....	43
2. Succession des stades de floraison et de développement des baies .....	44
3. Identification automatique des baies sur la grappe .....	47
4. Croissance du végétal.....	48
B- Algorithme PlantNet.....	49
C- Bilan hydrique du sol et de la vigne.....	51
1. Evapotranspiration .....	51
2. Déficit climatique .....	51
3. Etat hydrique du sol.....	52
D- Évènements climatiques observés et effets sur le matériel végétal.....	53
1. Vague de chaleur .....	53
2. Fortes précipitations .....	54
E- Communication des résultats.....	55
F- Réponses aux hypothèses.....	57
1. Suivi du développement de la vigne et des baies .....	57
2. Suivi de la diversité floristique associée .....	57
3. Corrélation avec les variables climatiques.....	57
IV – DISCUSSION.....	59
1. Points de vigilances.....	59
2. Perspectives du projet.....	60
CONCLUSION.....	62
BIBLIOGRAPHIE .....	
TABLE DES FIGURES .....	
TABLE DES TABLEAUX .....	
ANNEXES .....	

## **SIGLES ET ABREVIATIONS**



# INTRODUCTION

Durant l'été 2022 de nombreuses vagues de chaleur se sont succédé aux quatre coins de la métropole. Ces vagues de chaleur, couplées à de faibles précipitations ont entraîné une importante sécheresse dans tout le pays. Le manque d'eau se fait ressentir sur toutes les cultures et la viticulture ne déroge pas à cette règle (Bazireau, 2022).

Les changements climatiques représentent l'un des enjeux majeurs de notre siècle. Les récents rapports des groupes d'experts sur le climat (Pörtner & Roberts, 2022) nous informent que quoi qu'il arrive nous devons faire face à un climat de plus en plus contraignant. L'agriculture rencontre de nouvelles problématiques imposées par ces évolutions climatiques. Ces problèmes environnementaux impactent à la fois les plantes cultivées (cultures semées ou pérennes) et la biodiversité associée (animale ou végétale) des agrosystèmes, avec pour conséquences la disparition d'espèces. Les changements climatiques rentrent dorénavant dans l'équation de la viticulture, la vigne étant une culture pérenne qui se raisonne dans le temps.

Ces impacts environnementaux se retranscrivent ensuite à l'échelle du paysage. L'intérêt de l'étude consiste à concevoir des plateformes autonomes d'observations de ces changements climatiques. Cela consiste dans un premier temps en l'observation des modifications du climat climatiques ensuite dans l'étude des conséquences de ces évolutions sur un agrosystème. L'enjeu auquel nous faisons face pour ce stage consiste à élaborer une plateforme de suivi conjoint et colocalisé de la physiologie de la vigne ainsi que de la diversité floristique de l'inter-rang en réponse aux événements climatiques extrêmes. Il nous faut réaliser une preuve de concept sur la mise en place d'un dispositif de mesure des variables climatiques afin de les interpréter et d'en ressortir la présence d'éventuels événements extrêmes. Ce dispositif comprendra également un système de mesure du développement végétatif et reproductif de la vigne, et un système d'étude de la diversité floristique.

Ce présent rapport aura pour mission de présenter dans un premier temps une liste non exhaustive des divers évolutions climatiques. Ces évolutions climatiques seront par la suite corrélées aux cycles végétatifs des plantes, dans notre cas de la vigne, afin d'étudier les dégâts et les modifications engendrées. La notion de biodiversité associé, appliqué à notre milieu méditerranéen, sera également définie et étudiée Un lien sera réalisé entre les événements climatiques et leurs conséquences sur cette biodiversité florale. Nous ferons par la suite un tour d'horizon des méthodes de viticulture connectée qui nous ont servi de points de repère dans l'élaboration du prototype d'observatoire. Comment les techniques ont évolué et nous ont amené à observer les grappes. Cet état de l'art prendra place avant la présentation de notre prototype d'observatoire des changements climatiques au sein de la parcelle de vigne. Nous présenterons les différents capteurs utilisés et surtout leur intérêt général dans l'observation des changements climatiques. Nos résultats consisteront à présenter les événements climatiques subis durant la période de mise en place de l'observatoire et leurs effets sur la culture associées. Pour cela nous essaierons de mettre en relation les résultats des capteurs utilisés pour évaluer au moins la croissance du végétal et l'évolution de la biodiversité associée.

# I - CONTEXTE

## A- Projet MOMAC

### 1. Description des organismes de recherche et UMR du projet

#### a. INRAE

Après-guerre naît un Institut National de Recherche Agronomique, **INRA**, ayant la vocation d'optimiser les productions agricoles du pays. Les problématiques scientifiques et technologiques, posées par la demande alimentaire, représentent l'un des piliers fondateurs de l'organisation. A la suite de la fusion avec l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Agricultures et l'Environnement, **IRSTAE**, l'INRA changea de nom le 1<sup>er</sup> janvier 2020 pour devenir l'Institut National de Recherche pour l'agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, **INRAE**. Il s'agit d'un organisme public de recherche dont les thématiques sont organisées autour de divers thèmes comme l'agroécologie, la réponse des systèmes agricoles aux changements climatiques ou le maintien de la biodiversité et la sécurité alimentaire. Ces sujets donnent lieu à des projets de recherche financés par différents organismes ou fondation à l'échelle nationale ou européenne. En contrepartie, les porteurs de ces projets ont des obligations de publication d'articles scientifiques en lien avec le sujet étudié. En 2022, l'INRAE comptabilise plus de 10 000 agents répartis dans 18 centres de recherche situés sur quasiment tout le territoire national.

L'organisation d'un centre de recherche fonctionne autour d'une cellule de fonctionnement principale : l'Unité de Recherche. A l'échelle de l'INRAE, ces unités sont souvent des unités mixtes (UMR) qui regroupent en plus des agents INRAE, d'autres agents provenant d'autres organismes de recherche (CNRS, CIRAD, IRD) ou d'enseignement supérieur (Université, Ecole d'Ingénieur). Chacune des UMR est administrée indépendamment des autres et doit respecter son propre budget. Dans chacune des unités, un directeur habilité est nommé pour un contrat, renouvelable, de cinq ans. La manière dont l'UMR va allouer son budget à ses différentes équipes lui est propre tout comme la ligne directrice de recherche que le laboratoire, en concertation avec ces chercheurs, décide de suivre. Les UMR sont organisées autour d'une ou plusieurs thématiques particulières. Lorsqu'il y a plusieurs thématiques celles-ci sont bien souvent liées. Ces thématiques variées peuvent porter sur de la science du sol, de la nutrition ou de divers enjeux sociétaux, par exemple. Les centres de recherche, disséminés partout dans la France métropolitaine et dans les départements et territoire d'outre-mer, intègrent de nombreuses UMR. L'identité d'un centre de recherche est fortement liée au territoire dans lequel il est implanté (activités de recherche importantes en viticulture sur le centre de Bordeaux, sur le tournesol à Toulouse, sur la recherche animale à Rennes etc...). En ce qui concerne le centre Occitanie-Montpellier, celui-ci traite de diverses espèces cultivées autour de la Méditerranée (vigne, blé dur...) en lien également avec des partenaires étrangers du bassin méditerranéen. En effet, les centres peuvent être tournés vers l'international en réalisant de nombreux partenariats avec divers centres situés dans d'autres pays (Européens ou non). Cela se traduit par la cosignature de publications avec ces partenaires internationaux.

#### b. Les UMR du projet (LISAH, LEPSE)

Les projets de recherches peuvent mettre en relation plusieurs UMR. C'est le cas pour le projet MOMAC qui relie notamment le LISAH et le LEPSE tous deux présents au sein du centre de recherche de Occitanie-Montpellier

Le Laboratoire d'étude des Interactions entre Sol-Agrosystème-Hydrosystème, **LISAH**, se situe sur le campus de l'Institut Agro - Montpellier. Il regroupe trois différentes équipes de recherches dont les thématiques principales gravitent autour de l'étude des sols et de leurs réserves en eau, des plantes cultivées et des pratiques agricoles associées, du paysage méditerranéen et de son aménagement. L'implantation autour de la Méditerranée représente un axe majeur du laboratoire puisqu'il est également implanté en Tunisie afin d'étudier différents bassins versants et élémentaires. Au sein du LISAH, les travaux liés à ce stage de fin d'étude prenaient place au sein de l'équipe d'Ecohydrologie. Cette notion transdisciplinaire consiste à étudier les interactions entre le cycle de l'eau et les écosystèmes. L'équipe porte son attention autour de trois axes de recherche. Dans un premier temps, les études portent sur la caractérisation des variabilités naturelles et anthropiques d'un agrosystème sur le cycle de l'eau ou le couvert végétal. Ensuite, l'objectif consiste à essayer de comprendre les processus écohydrologiques d'un agrosystème, c'est-à-dire comprendre le lien entre les pratiques agricoles, le cycle de l'eau du ruissellement à la nappe souterraine et l'écologie des populations végétales des milieux associés. Enfin, un aspect modélisation structure-fonction est également présent dans l'équipe afin d'intégrer les deux thématiques précédentes.

Le Laboratoire d'Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux, **LEPSE**, également situé sur le campus de Montpellier Supagro, a pour objectif d'étudier les réponses des plantes aux conditions environnementales. Cette unité porte une attention particulière aux conséquences des stress hydriques et thermiques sur les couverts végétaux et les manières de lutter contre ces perturbations. Le laboratoire travaille autour de deux axes principaux : l'évaluation de la performance de nouvelles variétés et l'étude de systèmes de cultures innovants. Les recherches portent sur la performance des variétés actuelles en réponse à une contrainte telle que, par exemple, le stress hydrique. Pour cela, les membres du LEPSE ont recours à des plateformes de phénotypage permettant de suivre plusieurs centaines de plants sous une atmosphère contrôlée. Ces plateformes permettent ensuite de mesurer la croissance du végétal en récoltant différentes données sur la réponse au stress hydrique principalement et ce quasiment en temps réel. L'unité est composée de deux équipes de recherche, l'une travaillant sur le blé et le maïs et l'autre sur la vigne. Une place importante est également donnée dans ce laboratoire aux approches de modélisation, avec comme objectif d'utiliser ces modèles pour évaluer le comportement des variétés face à différents scénarii de contraintes abiotiques.

#### c. Campus de La Gaillarde et vignoble expérimental

L'étude réalisée portera plus particulièrement sur le vignoble de La Gaillarde situé sur le campus de l'Institut Agro - Montpellier. Cette parcelle expérimentale a pour objectif d'être un lieu d'observation d'une quantité importante de cépages (180 espèces cultivées) et des modes de conduites (12 modes de conduites différents sur un même cépage : Syrah). Il s'agit également d'un vignoble pédagogique qui a pour vocation de servir d'outil de transmission des connaissances liés à la vigne en plus de servir d'outil pour diverses expérimentations (INRAE,

2021). Ce vignoble représente un appui théorique et pratique conséquent aux différents cursus scolaires en lien avec la vigne au sein de l'Institut Agro.

Le projet d'implanter cette parcelle sur le campus est née en 1998 dans l'objectif de réhabiliter la collection ampélographique présente historiquement sur le campus. Sur une surface d'un hectare d'importants travaux ont été réalisés afin de créer un endroit artificiel propice au développement et à la culture de la vigne. Sur 2m de profondeur le sol a été décaissé. Ensuite, une bâche recouvrant entièrement le fond afin d'isoler le sol et un substrat a été déposé. Un système d'irrigation fut également installé afin d'apport eau et nutriment (fertirrigation) nécessaire au bon développement de la vigne dans cet espace fortement artificialisé. Nous détaillerons plus en détail les propriétés pédologiques du sol et le matériel végétal utilisé dans la présentation de notre lieu d'étude.

## **2. Le projet MOMAC**

### **a. – Description du projet**

Le projet MOMAC (acronyme utilisé pour le projet intitulé "Monitoring Mediterranean Agro-ecosystem from fields to landscapes") a commencé en octobre 2021. Ce projet est financé par la fondation Agropolis pour une durée de trois ans. Ce projet regroupe six unités dont le LEPSE et le LISAH situés sur les centres de Montpellier et d'Avignon travaillant sur la vigne et le pommier. Les travaux à réaliser dans ce projet s'axent autour de divers objectifs. Dans un premier temps, il s'agit de la mesure des effets pluriannuels du changement climatique sur la phénologie des plantes cultivés et sur la biodiversité des milieux associés à l'échelle de la parcelle mais également du paysage. Concrètement cela consisté à observer les adaptations des écosystèmes aux changements climatiques et aux événements extrêmes qu'ils engendrent. Le projet comprend également le développement de technologies permettant de mesurer les relations entre le climat, le développement de la plante cultivée et la biodiversité. MOMAC part de l'hypothèse que les changements climatiques influencent le fonctionnement des plantes et la biodiversité associé (espèces végétales du rang, population de ravageur, maladies cryptogamiques). Ces perturbations entraînent des modifications dans les pratiques agricoles. En effet, les agriculteurs, dans une idée de lutte face aux nouvelles pressions, essaient d'optimiser et de protéger leurs cultures. L'innovation des pratiques conduiront à des changements significatifs dans la structure du paysage. De la même manière que la présence d'un nouveau matériel végétal ou de nouvelles espèces entrainera des modifications plus ou moins profonde dans les écosystèmes (Figure 1).

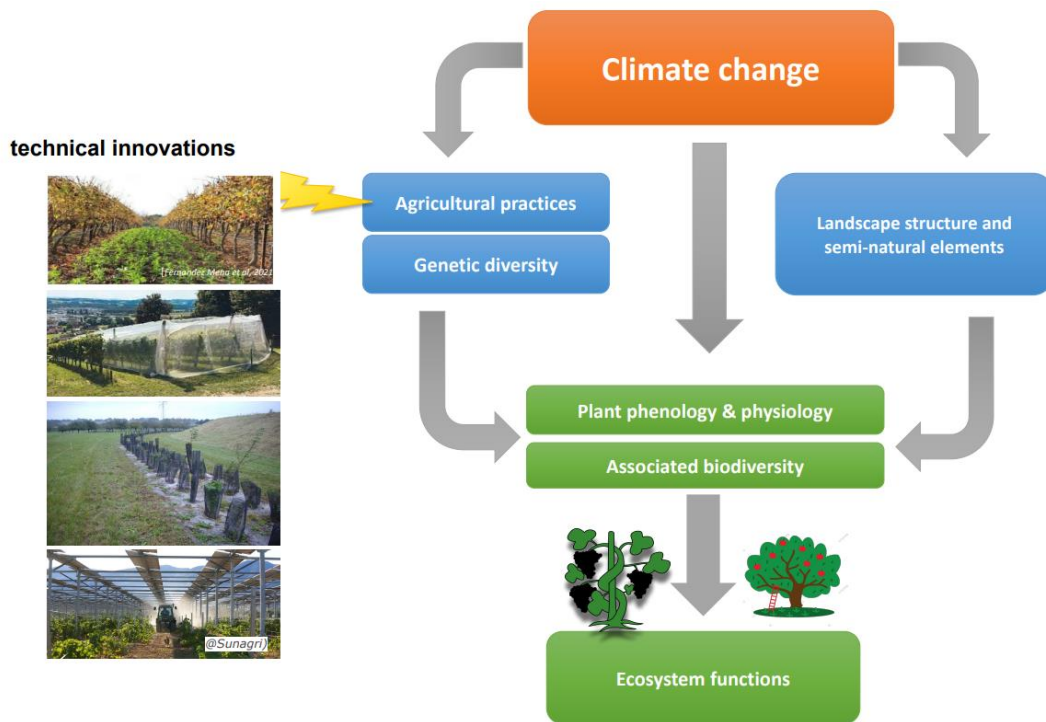


Figure 1 : Schéma des hypothèses du projet MOMAC (MOMAC.,2021)

#### b. Les axes de l'étude

Le projet MOMAC s'axe autour de plusieurs groupes de travail, appelés WorkPackages (WP) (Figure 2).

La première partie correspond à **l'instrumentation du vignoble pédagogiques** de Montpellier SupAgro. Les activités de cette partie du projet consiste à créer un premier observatoire de référence sur le vignoble du campus de La Gaillarde. Ce prototype permettra l'observation conjointe des variables édaphiques et climatiques, du développement végétatif et reproductif de la vigne et la biodiversité des milieux interstitiels, rang et inter-rang d'une parcelle de vigne. Une attention particulière sera portée sur la communication des résultats sous la forme d'un site web. Cet espace numérique rassemblera et présentera les informations obtenues à l'aide des différents capteurs. Pour ce prototype d'observatoire l'accent se porte sur l'autonomie des capteurs. Cela sous-entend d'être capable d'acquérir et de transmettre de la donnée sans action humaine pendant plusieurs mois, idéalement une année. Dans cette optique, les capteurs et leur système de transmission devront avoir une faible consommation en énergie. Cette station d'observation devra également être répliquable pour être déployée sur d'autres sites d'étude du projet.

**L'amélioration de la plateforme de phénotypage** prend place dans un deuxième axe d'étude du projet. L'objectif de cette partie du projet consiste à l'étude en temps réel des réponses aux stress climatiques des plantes cultivées. Les travaux porteront autour de l'amélioration de l'actuelle plateforme de phénotypage en développant des modules de phénotypage permettant le suivi en temps réel de la transpiration des plantes en réponse au déficit hydrique. A terme, si la preuve du concept est réalisée, l'objectif sera de dupliquer ces modules plateforme afin de pouvoir l'ouvrir à d'autres projets de recherche autour de l'observation des impacts de stress environnementaux sur la phénologie de la vigne.

Un axe de travail supplémentaire intègre le **suivi de la biodiversité animale et végétale** des paysages agricoles, la parcelle et ce qui l'entoure. Ce troisième groupe de travail axe ses recherches autour de la biodiversité végétale et animale. L'intérêt de ce groupe de travail repose sur l'observations de l'impact des pratiques agricoles sur le paysage. Le travail consiste à observer les changements que ces nouvelles pratiques ou leur intensification pourraient apporter au paysage et à sa biodiversité (animale et végétale) associée. Dans ce WP il y a également la volonté d'identifier et de comparer les pratiques entre elles afin d'identifier celles qui répondent efficacement aux nouvelles problématiques amenées. Les changements au sein des parcelles agricoles tels que l'enherbement total ou partiel de la parcelle, l'utilisation d'un couvert spontané ou semé et les espèces présentes dans ce couvert vont impacter la structure même du paysage. Afin d'identifier les évolutions de pratiques culturales, des entretiens sont prévues avec les agriculteurs qui travaillent sur ces terres pour avoir leur avis, leur vision ainsi que l'historique des pratiques associées à leurs parcelles dans la zone d'étude. L'objectif sera ensuite d'identifier les relations entre les évolutions des supports de biodiversité et les espèces associées. Pour l'observation de la biodiversité végétale cela peut consister à étudier la succession des couverts spontanés dans la parcelle ou l'impact d'un couvert semé sur le paysage. Quant à la biodiversité animale il est prévu d'utiliser des enregistreurs sonores et ultrasonores pour identifier la diversité en oiseaux et en chauve-souris des parcelles du réseau.

Enfin les deux derniers axes prennent en compte la **gestion des données et communication des résultats**. Deux types principaux de données seront collectées dans le projet. Une première forme de données dites "légères" (température air et sol, humidité relative...) qui ne nécessitent qu'un traitement simple (présentation sous forme de graphique avec ou non un traitement simple de données en amont) avant d'être présentées sur des plateformes web. La seconde forme, données dites "lourdes", intègre les acquisitions d'images et des enregistreurs sonores. Ce sont des données qui requièrent un traitement plus important avant de faire l'objet d'une diffusion (analyse d'image, identification des sons). Un plan de gestion de la donnée, de son acquisition à son partage en passant par son traitement sera à définir. Le stockage de ces données et leur identification à l'aide de métadonnées associées représente également un axe de travail de ces WP. Les différentes infrastructures du projet (à

savoir les différents observatoires et plateformes) pourront être utilisées à des fins pédagogiques en lien avec l'Institut Agro.

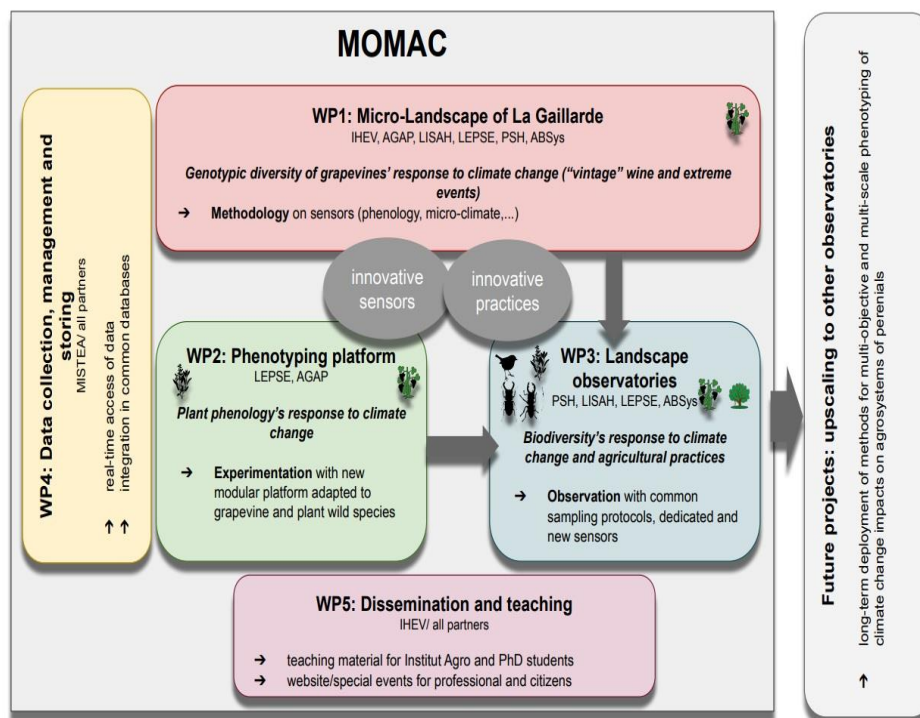


Figure 2 : Représentation schématisée des liens entre les différents WPs du projet MOMAC (issue de la description du projet MOMAC., 2021)

## B-Etat de l'art

### 1. Changements climatiques

De récents rapports internationaux informent des changements climatiques à venir dans le monde (Pörtner & Roberts, 2022). Les modélisations permettent d'estimer les variations de températures mais également d'établir une prédiction des événements extrêmes. La région méditerranéenne ne fait pas exception à la règle. Elle sera confrontée à divers phénomènes climatiques. Cette partie a pour objectif de décrire les changements climatiques majeurs qui impacteront considérablement la culture de la vigne.

#### a. Evolution des températures

La première observation citée dans ce rapport porte sur **l'augmentation de la température** sur les dernières décennies. Le graphique (Figure 3) montre entre autres une augmentation des températures moyennes de 1951 à 2018. On peut faire un lien avec une étude grecque récente étudiant l'évolution des températures sur l'île de Santorin en méditerranée. Cette étude constate une augmentation de 3,8°C des températures moyennes de la période mars-août sur l'île (Xyrafis et al., 2022). On peut ajouter que ces observations ne sont pas récentes. Au début du 21<sup>ème</sup> siècle on attestait déjà d'un réchauffement climatique en relevant les données du 20<sup>ème</sup> siècle. On attestait d'une augmentation de la température moyenne de 0,7°C avec une supposition réalisée à +1,5°C dans les années à venir (Houghton,

2005). Cet accroissement des températures moyennes conduit à l'arrivée d'évènements qualifiés d'extrêmes tel que les vagues de chaleurs (Figure 3B).

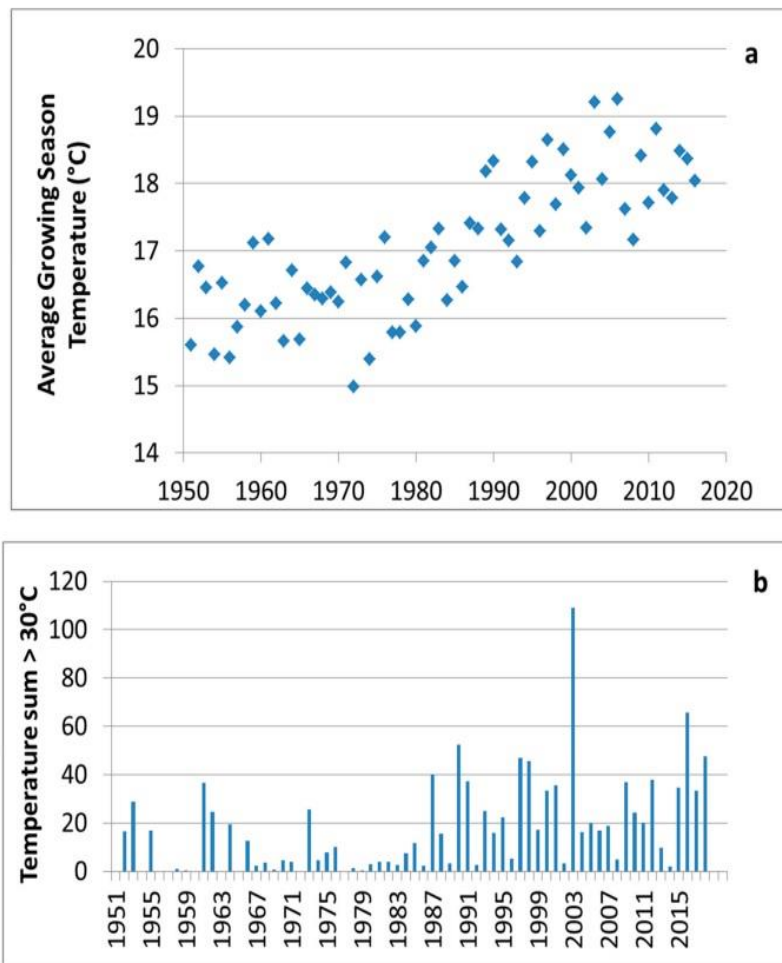


Figure 3 : Evolution de la température moyenne durant la période de croissance de la vigne (A) et nombre de jour avec des températures supérieure à 30°C par an (B) à Bordeaux entre 1951 et 2018 (Van Leeuwen et al., 2019)

Une évènement climatique de chaleur extrême (ou **vague de chaleur**) se définit par une succession de journée à température élevée provoquant des dommages pouvant entrainer la mort des tissus vivant (Meehl & Tebaldi, 2004; Perkins-Kirkpatrick & Gibson, 2017). Une vague de chaleur se traduit par la présence de température largement supérieures à la moyenne en journée mais également la nuit (Luber & McGeehin, 2008) c'est cette succession qui définit également une vague de chaleur. Le carte ci-dessous (Figure 4) permet de témoigner de l'augmentation du nombre de journée de chaleur extrêmes selon l'un des scénarii fournis par le GIEC. Cette augmentions se montre particulièrement marquée dans le pourtour méditerranéen. Néanmoins toutes l'Europe se trouve affecté par cette augmentation des températures (Prodhomme et al., 2022).



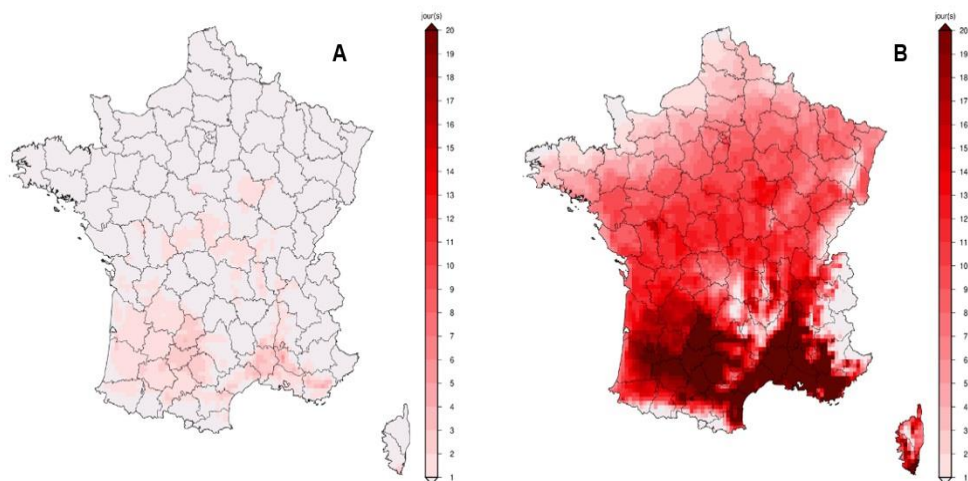


Figure 4 : Schéma du pourcentage annuel du nombre de journée avec une température maximale supérieure à 35°C en France sur l'horizon 1976-2005 (A) et sur l'horizon 2071-2100 selon le scénario RCP8.5 du GIEC (B) (Schwarz & Soubeyroux, 2022).

Une période de **gel** correspond au passage de la température ambiante sous un seuil critique. On parle de stade critique lorsque les effets du gel se ressentent sur les tissus cellulaires en entraînant la mort de ces derniers (Evans, 1999). En viticulture on considère comme gel toutes les chutes de températures sous les 0°C à laquelle la plante est exposé après le débourrement (Mosedale et al., 2015). Les dégâts provoqués au végétal sont développés plus loin dans ce rapport. Plusieurs études montrent l'augmentation de la fréquence de cultures endommagées par des gels de printemps (Inouye, 2000; Leolini et al., 2018). Cette évolution, est paradoxalement imputable à l'augmentation des températures hivernales. En effet, l'une des principales raisons de ces dommages réside dans la précocité d'apparition du débourrement (Menzel & Fabian, 1999). L'apparition avancées des premiers stades phénologiques les exposent à la chute des températures, parfois sous les 0°C, très précocément au printemps.

#### b. Précipitations

Les variations du volumes des **précipitations** en France ces 50 dernières années montrent des disparités. On constate des différences selon un gradient nord sud au sein du pays. Pour ce qui est de la région qui nous intéresse, le pourtour méditerranéen, on observe une diminution des volumes annuels de précipitations (Figure 5). Paradoxalement, dans ces régions le nombre d'épisodes de pluie torrentiels (supérieur à 50mm en une journée augmente (Alpert, 2002; Brunetti et al., 2001). Ces orages se déroulent principalement à l'automne après les vendanges et ne sont que de peu d'utilité pour pallier au manque d'eau pour la culture dans nos régions méditerranéennes.

### RR (1960-2010)

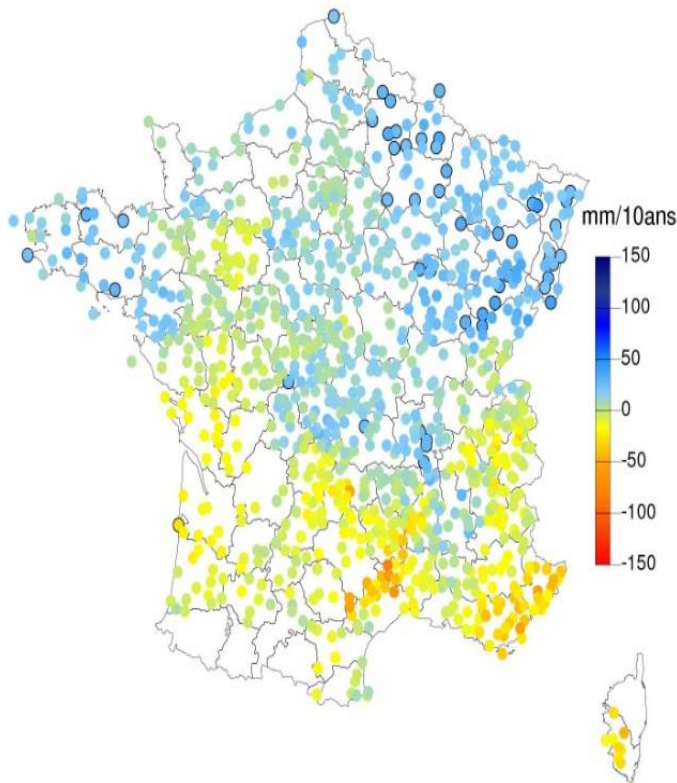


Figure 5 : Carte des

variations de précipitations en France entre 1960 et 2010 (Gibelin, 2015)

On observe également une perte d'efficacité de nos pluies. Les épisodes dépassant le seuil de 50mm par jour pénètrent moins efficacement dans les nappes. L'explication porte sur les effets de ruissellement plus important lorsque nous faisons face à des épisodes pluvieux intenses. Le tableau (Tableau 1) résume bien l'augmentation de la fréquence des épisodes de pluies intenses dans les régions méditerranéennes. Toutefois, il existe de forte variabilité à la fois spatiale et temporelle entre différentes stations autour du bassin méditerranéen avec une variabilité interannuelle marquée (Laget et al., 2008; Ramos, 2001; Zhao et al., 2021). Les épisodes pluvieux sont parfois accompagné d'évènement électromagnétiques.

Tableau 1: Tableau de l'évolution de la répartition des précipitations des différents évènements pluvieux classés par intensité de 1976 à 2005 dans le Languedoc-Roussillon (Laget et al., 2008)

Rainfall threshold in mm	1976 - 1980	1981 - 1985	1986 - 1990	1991 - 1995	1996 - 2000	2001 - 2005
< 10	21%	37%	32%	29%	26%	15%
11 < rainfall < 30	46%	40%	44%	44%	47%	29%
31 < rainfall < 50	20%	9%	4%	17%	10%	15%
> 51	13%	14%	20%	10%	17%	41%

Un **orage** se définit par un air considéré chaud et saturé en humidité qui rencontre un air atmosphérique plus froid (Bazin, 1860). Certains orages se composent d'eau à l'état solide qui ne fond pas lorsqu'elle retombe sur la terre, on parle alors d'orage de grêle. La formation de grêle dépend du temps pendant lequel la masse d'air saturé va rester dans une poche froide. Plus ce temps est long plus l'eau pourra passer à l'état solide et former des grêlons de

taille suffisamment importante pour ne pas fondre en retombant au sol lorsque le cumulonimbus éclate (Brant Foote, 1984; Risi & Roux, 2020). Les événements orageux peuvent être caractérisés par l'apparition de fortes précipitations (supérieur à 50mm). On remarque une augmentation du nombre de ces événements depuis le milieu du 20ème siècle dans différents endroits du monde dont notamment le pourtour méditerranéen (Lai et al., 2021; Nouaceur et al., 2013). Le graphique suivant (Figure 6) nous permet de visualiser cette augmentation.

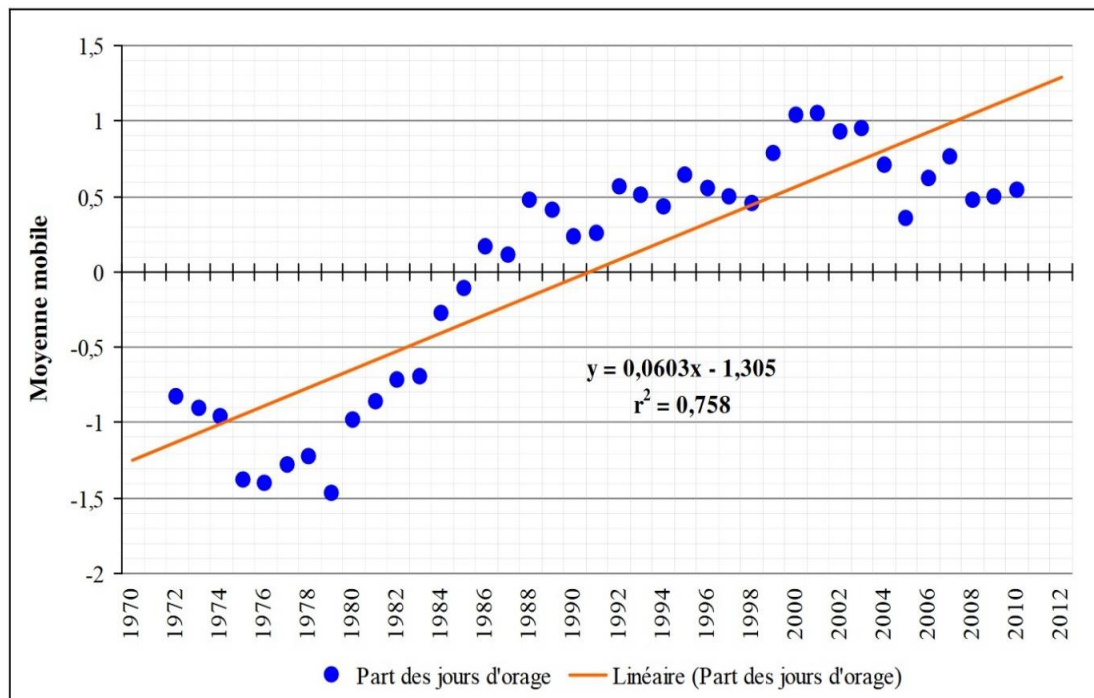


Figure 6 : Graphique de l'évolution de l'écart à la moyenne de la part des jours d'orage par an de 1972 à 2012 sur six stations de la côte méditerranéenne algérienne (Nouaceur et al., 2013)

Nous pouvons accorder plusieurs définitions au terme de **sécheresse**. D'un point de vue météorologique il s'agit d'une période avec un volume de précipitation inférieur à une moyenne établie pour une région. D'un point de vue agricole on peut parler d'un volume de précipitation annuel inférieur au minimum requis pour le développement des cultures (Glantz & Katz, 1977). En viticulture il est préconisé de conduire la vigne en déficit hydrique modéré pour limiter le développement végétatif et favoriser le développement des composés phénolique de la baie (Van Leeuwen et al., 2003, 2009). Cependant, on considère qu'une pluviométrie annuelle inférieure à 350mm/an représente un danger pour le végétal (Carbonneau et al., 2020).

### c. Ensoleillement

On peut simplifier la mesure du **rayonnement solaire** par le rayonnement total ou global. La mesure de cette valeur se fait en énergie, à savoir en watt par mètre carré ( $W.m^{-2}$ ) (Varlet-Grancher et al., 1989). Nous étudions le rayonnement en mesurant le flux de photon. Cela peut se faire de deux manière : en mesurant le rayonnement photosynthétique actif (PAR)

(McCree, 1973). Les variations de l'ensoleillement suivent un cycle de 10ans (Wild, 2009). Ce cycle semble montrer une légère augmentation sur les valeurs d'ensoleillement globale (Lean, 2010). La nébulosité, c'est-à-dire le taux de couverture nuageuse, induit directement des modifications dans le rayonnement solaire reçu à la surface de la Terre. Plus précisément, une augmentation de la nébulosité engendre une diminution du rayonnement solaire à la surface de la Terre (Wyrd et al., 2017). On observe toutefois une tendance à l'augmentation de la durée d'ensoleillement induisant une augmentation du rayonnement globale au cours du 20<sup>ème</sup> siècle et depuis le début du 21<sup>ème</sup> siècle (Barbeau, 2007).

## 2. Physiologie de la vigne

*Vitis vinifera* représente une espèce végétale pérenne largement cultivé à travers le monde. Le développement de la vigne sur une année correspond à la succession de différents stades phénologiques. Différentes variables climatiques induisent l'apparition et la durée de ces stades. Nous évoquerons également les modifications et les réponses physiologique entrainés par les contraintes climatiques.

Dans cette partie nous allons nous intéresser aux différentes étapes d'un cycle de production de la vigne (Figure 7). C'est-à-dire de la sortie de la dormance hivernale à la maturité des fruits, les baies de raisin et leur récolte.

La première étape du développement végétatif de la vigne consiste à sortir de sa phase de **dormance hivernale**. Ce réveil est entrainé par une remonté de la sève brute dans le xylème. On observe alors un phénomène nommé « Les pleurs de la vigne » où l'on peut voir la sève couler par les plaies de taille préalablement réalisé. Cette remontée de la sève va entrainer la sortie de dormance des bourgeons. Cet éveil intervient avant une période de 7 jour consécutive où les températures descendent en dessous de 10°C. Ensuite, la température qui entrainera la montée de la sève et induira le développement des bourgeons dépend du cépage. Par exemple, le cépage Cabernet Sauvignon requiert une température minimale de 12°C (Pouget, 1988).

Une fois la montée de sève effectuée, les bourgeons entament leur développement, il s'agit du **débourrement**. Visuellement cela se traduit dans un premier temps par un gonflement du bourgeon recouvert d'une fine couche de protection cotonneuse. Ensuite, vont apparaitre de jeunes pousses vertes perçant le coton. L'étape suivante correspond au développement du feuillage. Ces étapes sont induites et contrôlées par les températures. Elles dépendent également du cépage (Pouget, 1988). La sortie des premières feuilles correspond à une période critique où le bourgeon se montrent relativement sensible aux faibles températures. En dessous de -3°C il peut se nécroser entrainant un arrêt brutal du développement des feuilles.

Peu après le développement et la croissance des feuilles suit l'apparition des **inflorescences**. Dans un premier temps sous la forme de grappes compactes mais visible et différenciables des feuilles. Ces organes vont ensuite lentement se séparer afin de former les boutons floraux prêt à être fécondés mais également prêt à féconder. Les vignes possèdent des étamines et un pistil qui fleurissent en même temps (Lorenz et al., 1995). En effet, l'autogamie est le moyen de fécondation préférentiel de la vigne. Lorsque cette fécondation a lieu l'ovaire va initier un grossissement et une multiplication cellulaire, on utilise alors le terme de nouaison. Ce sera le début du développement des fruits. La fécondation puis la nouaison

représentent des périodes sensibles où les variations climatiques peuvent avoir de lourds impacts sur le développement des futurs fruits. Deux phénomènes importants peuvent avoir lieu lorsque les conditions ne sont pas favorables au moment de la fécondation. Une absence de fécondation d'une grande partie des fleurs entraînant leur dessèchement puis à terme leur chute. Cela se nomme la coulure. Parfois, la fécondation a tout de même lieu mais la baie se développe anormalement et le raisin n'arrive jamais à maturité en restant de petite taille. Ce phénomène porte le nom de millerandage (Carbonneau et al., 2020).

Le **développement des baies** consiste en un grossissement de l'ovaire par une multiplication et une élongation des cellules. Au stade nouaison la baie a atteint 30% de sa taille finale, il s'agit encore d'un organe chlorophyllien capable d'effectuer la photosynthèse. A ce stade la baie est verte et ferme. Elle accumule différents composés dont les acides organiques (notamment d'acide malique). Une fois la nouaison atteinte, le grossissement des baies est quasiment dû uniquement à l'élongation des cellules. Le raisin est un fruit à chair dont la forme dépend du cépage. Il se compose de plusieurs pépins en son centre entourée par la pulpe (le mésocarpe) elle-même contenue par la peau (le péricarpe) du raisin. Les sucres, acides organiques, acides aminés ou les éléments minéraux vont être contenu majoritairement dans la pulpe du raisin. A la véraison, l'aspect de la baie va être modifié. Dans un premier temps les baies vont changer de couleur perdant peu à peu leur chlorophylle, de surcroît elles perdent leur capacité photosynthétique. En général, les cépages blancs voient leurs baies devenir jaunes et légèrement translucides tandis que les cépages rouges voient leurs baies devenir rouges. Plus que l'aspect, c'est la texture qui se trouve également modifiée puisque les fruits commencent à se ramollir. Les raisins vont initier la maturation en se chargeant en sucre. Les sarments vont également commencer à se lignifier, cela se traduit par un brunissement et une rigidification du bois (Carbonneau et al., 2020). La notion de maturité optimale est difficile à décrire car il s'agit d'un concept vaste et propre à la volonté de chaque domaine viticole. La maturité physiologique correspond au moment où le raisin se trouve capable de germer.

Lorsque les derniers raisins sont récoltés, en juillet, août, septembre ou même octobre dans nos vignobles de l'hémisphère nord la vigne va lentement initier son entrée en dormance. Dans un premier temps on peut observer l'**aoutement**. Ce phénomène correspond à une lignification complète des sarments. Les sarments deviennent entièrement bruns et se rigidifient. Cette étape précède généralement la chute des feuilles au moment de l'automne. Le végétal entre alors dans cette phase de dormance qui lui permettra de passer l'hiver. Un cumul de température inférieur à 10°C à la fin de l'hiver permettra d'initier la sortie de dormance. Pendant cette phase de dormance la vigne se montre résistante aux températures négatives si elles ne descendent pas en dessous de -15°C.

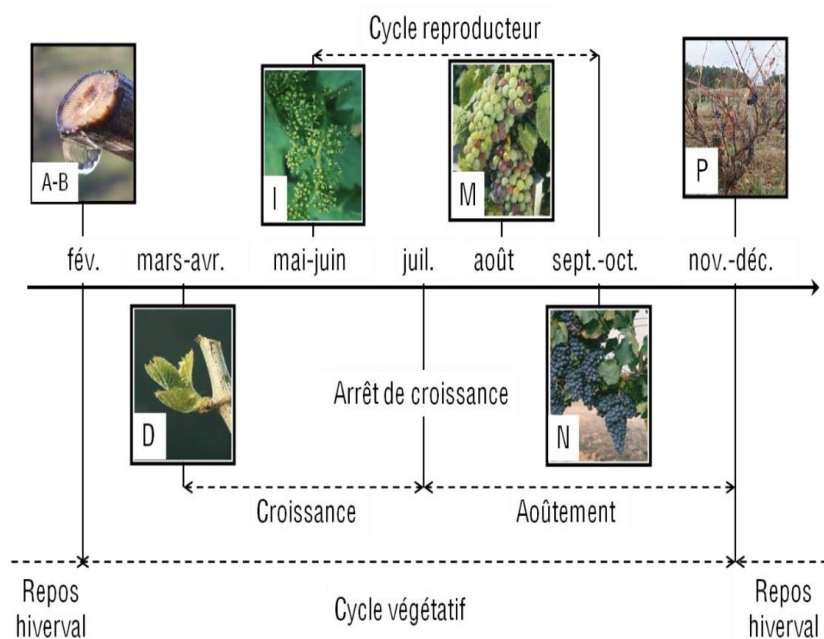


Figure 7 : Schéma représentant le cycle phénologique de la vigne (Cuccia, 2013)

#### d. Réponse aux contraintes environnementales

La définition du terroir donné par l'OIV en 2010 accorde une place importante à la notion de climat. Les évolutions climatiques ont déjà et continueront d'avoir des conséquences importantes sur la viticulture. Ces changements apportent leur lot de contrainte au matériel végétal. Nous allons essayer de reprendre les événements présentés précédemment en expliquant l'impact sur la culture de la vigne. C'est-à-dire que nous allons étudier les contraintes que les différents changements climatiques et les événements extrêmes apportent au végétal aussi bien sur la vigne que sur les végétaux du rang et de l'inter-rang.

On ne constate pas réellement une diminution du volume de précipitation annuelle au cours du temps. Cependant, on observe une perte d'efficacité quant à la pénétration au sein des nappes de ces volumes d'eau. La **contrainte hydrique** représente un stress abiotique important imposé à la vigne mais également aux diverses espèces florales de la parcelle. En effet, cette notion de contrainte hydrique va renforcer le questionnement autour de la concurrence pour les réserves en eau au sein de la parcelle entre la vigne et les autres plantes associés. L'intensité du stress hydrique sur la vigne peut se mesurer de différentes manières en utilisant les différentes mesures de potentiel hydrique. On sait maintenant que la plante va perdre de l'eau la journée au travers de la transpiration (Patakas et al., 2005). Ce phénomène va entraîner une chute du potentiel hydrique de la plante (Simonneau et al., 2014). En conditions normales, c'est-à-dire sans stress hydrique, la plante va rééquilibrer ses réserves la nuit. Le potentiel hydrique de base se rapproche de 0 au milieu de la nuit lorsque l'on considère la plante à un état d'équilibre hydrique. En effet, la nuit les stomates de la plante sont fermés ce qui laisse le temps à la plante de retrouver son intégrité hydrique (Zufferey et al., 2011).

Lorsque la plante ne dispose pas suffisamment d'eau nécessaire à son fonctionnement elle initie différents mécanismes alternatifs afin d'assurer sa survie. La première mesure afin

de préserver l'état hydrique des cellules va consister à refermer les stomates limitant de cette manière les pertes d'eau par transpiration. Néanmoins ce moyen de lutte va entraîner une baisse de l'activité photosynthétique de la plante. L'intensité de cette réaction semble toutefois dépendre du cépage (Chaves et al., 2009; Tzortzakis et al., 2020). Il existe des corrélations entre les volumes d'eau disponibles et les volumes de production. Le volume des baies, composantes du rendement, se trouve affecté par la contrainte hydrique (Intrigliolo et al., 2008) Dans les standards actuels de production de raisin de cuves on estime qu'un léger stress hydrique est bénéfique à la vigne. En effet, cela semble profiter à la concentration de composés phénoliques recherchés pour les vinifications. Cependant, une contrainte trop importante se montre préjudiciable sur la composition des baies pouvant entraîner une surconcentration en composés phénoliques (Deloire et al., 2020).

**L'augmentation des températures** moyennes cause différents problèmes. La première observation des agriculteurs fut de remarquer une précocité dans l'apparition des stades phénologiques (Tomasi et al., 2011). Le graphique suivant (Figure 8) permet d'illustrer ces tendances dans le temps. Il permet également de montrer la variabilité intra-annuel dans l'étude des stades phénologiques. Nous constatons une précocité dans tous les vignobles français. Celle-ci est corrélée directement avec l'évolution des températures. En effet, la somme des degrés jour représente une composante importante dans le développement du végétal, l'apparition des organes fructifères et la maturation des raisins (Carbonneau et al., 2020).

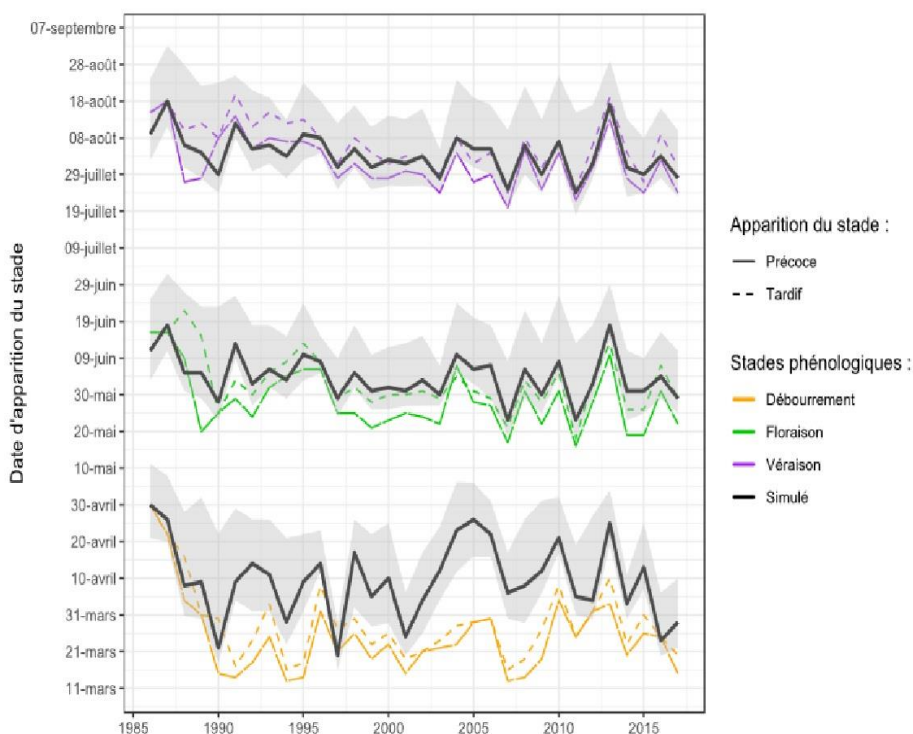


Figure 8 : Graphique de l'évolution des date d'apparition de divers stades phénologiques de 1985 à 2016 (Marjou, 2019).

Cette augmentation des températures moyennes tout autour du globe rend la viticulture difficile dans certaines régions tandis que de nouvelles zones apparaissent favorables à cette culture (Bonnardot & Quenol, 2020; Quenol et al., 2019). En effet, les climats viticoles peuvent

être classés selon un indice héliothermique (Tableau 2) prenant en compte la somme des températures maximales et minimales de l'air : l'indice de Huglin (Huglin & Schneider, 1998). L'augmentation des températures entraîne donc des modifications au sein de cette catégorisation puisque les régions viticoles tendent à être surclasser. Par exemple, un vignoble catégorisé de frais deviendra avec le temps un vignoble tempéré, modifiant intrinsèquement les contraintes s'imposant aux viticulteurs.

Tableau 2 : Tableau de la catégorisation des régions viticoles d'après l'indice de Huglin (Quenol & Roux, 2021)

Type	Valeur (°C)	Exemples
Très chaud	> 3 000	Vallée de São Francisco
Chaud	$2\ 400 \leq IH \leq 3\ 000$	Malaga (Espagne), Marsala (Italie)
Tempéré chaud	$2\ 100 \leq IH \leq 2\ 400$	Napa (USA), Montpellier (France)
Tempéré	$1\ 800 \leq IH \leq 2\ 100$	Pau, Bordeaux (France)
Frais	$1\ 500 \leq IH \leq 1\ 800$	Colmar, Angers (France)
Très frais	$IH \leq 1\ 500$	Québec (Canada), Londres (Angleterre)

La température impact la **maturité du raisin**, notamment la maturité technologique (lié à l'équilibre acide/sucre de la baie) Le chargement en sucre de la baie est une fonction du cépage mais également de la température de l'air (Parker et al., 2020). Ainsi, l'augmentation de la température entraîne une concentration plus importante des baies en sucres. Cette concentration plus élevée se traduit à la fin de la fermentation alcoolique par une teneur en alcool plus importante dans les vins. On constate également que les températures influent sur la teneur en composés phénoliques des raisins (Venios et al., 2020).

L'énergie solaire, mesuré ici par le **rayonnement global**, se montre fondamentale lors du développement et de la croissance du végétal. Cette énergie prend une part importante dans la photosynthèse. L'augmentation des durées d'ensoleillement et l'augmentation du rayonnement global affecte la vigne. Il y a une corrélation directe entre l'intensité du rayonnement global et le volume d'eau perdu par la plante par évapotranspiration, celle-ci augmente avec l'augmentation du rayonnement (Aslyng, 1974). L'un des principaux symptômes de l'exposition au soleil s'observe sur les grappes : on utilise le terme de coup de soleil. Lorsque les dégâts sont faibles on peut observer des taches brunes sur la partie des baies exposés au soleil. Sur les cépages rouges cela peut également prendre la forme d'une décoloration, le rouge des baies apparaît moins intense. Si le coup de soleil est plus important, dû à une exposition plus importante ou plus intense avec la source lumineuse, les baies peuvent présenter des craquelures à leur surface. Enfin, dans les cas extrêmes on peut observer une complète dessiccation de la baie (Krasnow et al., 2010).

La vigne est une plante pouvant résister à des **gels** intenses lorsque ceux-ci apparaissent pendant sa période de dormance. Durant cette période, seules des températures négatives extrêmes (inférieur à -15°C) peuvent entraîner la mort du végétal. On retrouve de la vigne dans certaines régions du Canada ou dans le nord de l'Europe comme en Allemagne. Ces zones présentent des hivers rudes mais suffisamment chaud pour permettre à la plante de survivre.



Lorsque l'on évoque les dégâts causés par le gel on se penche avant tout sur le gel printanier. C'est-à-dire, une température moyenne de l'air inférieur à 0°C à un stade bien précis du développement du végétal : la sortie des bourgeons. Ces gelées n'entraînent pas la mort de la vigne mais impact considérablement la récolte en nécrosant les bourgeons naissants. La gelée de ces organes à peine sortie de leur coton de protection inhibe parfois intégralement le développement du végétal durant la suite de l'année (Carbonneau et al., 2020). Dans les paragraphes précédents nous avons montré que la région méditerranéenne faisait face à une augmentation des températures moyennes annuels depuis le 20<sup>ème</sup> siècle. Cette augmentation du mercure entraîne un phénomène que l'on pourrait appeler les gels tardifs. Le nombre de jours de froid extrême tendent à diminuer cependant le nombre de gelées tardives (apparaissant au printemps) ne semblent pas décroître (Sgubin, 2018). Toutefois, les changements climatiques entraînent une précocité dans l'apparition des stades phénologiques, les bourgeons sortent de dormance de plus en plus tôt dans l'année (Tomasi et al., 2011). Une fenêtre critique apparaît puisque les bourgeons se montrent à des périodes où les températures sont encore susceptibles de chuter en dessous de 0°C. En résulte une exposition plus fréquente des organes en développement de la vigne à ces froids causant leur mort (Molitor et al., 2014). Cette tendance risque de persévérer dans la plupart des vignobles français où le risque de gelée était déjà présent. En effet, des modélisations montrent que les vignes resteront de plus en plus exposés au gelée d'hiver entraînée par la précocité de leur stade phénologique (Leolini et al., 2018).

Toutefois, il faut préciser que les changements climatiques ne touchent pas uniquement la vigne. La diversité floristique associée se trouve également affectée par ces évolutions du climat.

### **3. Biodiversité végétale dans les vignes**

L'enherbement des parcelles consiste à associer à la culture de la vigne une ou plusieurs autres espèces sous le rang de vigne ou entre les rangs. Ce terme est utilisé pour désigner la pratique d'entretien du sol ainsi que le couvert en lui-même. Cet enherbement se présente de deux natures. Il peut être semé volontairement par le viticulteur en fonction d'un raisonnement de qualité de la vendange, de rendement ou encore, par exemple, de maintien de la parcelle. Ce couvert peut également être spontané, cela signifie que le viticulteur va laisser l'enherbement se développer tout seul sans intervenir lors de la phase de développement. Toutefois, le viticulteur pourra toujours décider de réaliser divers travaux afin de contrôler cet enherbement spontané (tonte ou broyage par exemple). Dans ces deux cas les espèces que l'on retrouve dans cette pratique représente une part de la biodiversité végétale du vignoble.

La notion de biodiversité mérite d'être éclairci ici pour le reste du rapport. Ce terme s'apparente à la diversité d'être vivant selon différents niveaux à savoir la diversité génétique au sein d'une population, la diversité des espèces au sein d'un même lieu mais également la diversité des écosystèmes au sein d'un paysages (Loreau, 2005; E. O. Wilson & Peter, 1988). Par biodiversité végétale nous entendons la diversité d'espèces présentes dans une parcelle de vigne. Nous ne comptons pas prendre en compte la diversité génétiques de la vigne avec les différents clones utilisés, les différents cépages ou les différents porte-greffes.

Les pratiques agricoles influencent de manière importante la diversité et la densité des espèces dans le rang et l'inter rang de la parcelle de vigne (Winter et al., 2018). Cela revient à étudier l'assemblage d'espèces végétales qui co-occurrent sur un même espace en réponse

aux différents filtres appliqués sur cet espace. Partons du postulat que l'on possède un stock initial d'espèces floristiques au sein du rang identique pour deux parcelles viticoles. Le climat, qui représente un filtre parmi d'autre, va favoriser ou inhiber le développement de certaines espèces. Les pratiques agricoles représentent au même titre un filtre au développement de la biodiversité végétale (Gaba, 2012). D'un point de vue générale l'association de la vigne avec d'autres espèces végétales se raisonne principalement autour des notions de concurrence pour l'accès aux réserves hydriques ou azotés du sol. Il semblerait intéressant, après avoir ébauché une liste des espèces des nos vignobles méditerranéens, de considérer leurs interactions entre elles et avec la vigne. Le développement de cette diversité végétale et leurs réponses aux changements climatiques figurent également dans les hypothèses de recherche du projet MOMAC.

#### a. Description de la biodiversité floristique

Le **semis d'espèces** dans le rang ou l'inter-rang se matérialise de différentes manières. Un semis pour une couverture hivernale détruite au printemps et restituer à la vigne, un enherbement semi-permanent qui est détruit avant la vendange de l'année suivante et un enherbement permanent qui reste annuellement sur la parcelle. Pour cela, en fonction des besoins, diverses espèces sont semés. Les espèces répondent à des critères particuliers en fonction des besoins identifiés par le viticulteur. Deux familles sont principalement utilisées dans l'enherbement des vignobles. Les **graminées** (*Poaceae* telles que l'orge des rats ou le brome des toits, par exemple), permettant un taux de couverture rapide la première année mais avec un faible potentiel de re-semis les années suivantes. De plus, cela demande une préparation du sol parfois difficile dans les parcelles viticoles. Les **légumineuses** (*Fabaceae* telles que trèfle ou luzerne) possèdent également une bonne capacité à coloniser le milieu en première année. Toutefois, la pérennité se montre instable dans le temps. Ces espèces présentes l'avantage de fournir de l'azote au sol mais concurrence la vigne sur les réserves azotées. (Delpuech et al., 2012; Olivon et al., 2014) Ces deux familles sont rarement utilisées seules. Des mélanges légumineuses et graminées permettent de limiter les contraintes de chacune en bénéficiant de leurs avantages. Les espèces semées doivent toutefois cohabiter avec des espèces spontanées.

A l'opposée des espèces semées dans le rang pour leur intérêt agronomique nous retrouvons les **espèces spontanées**. L'image de ces plantes n'était pas très bonne au sein de la profession, jugées néfastes pour le rendement et la vie des vignes. Cependant, la flore spontanée possède la fonctionnalité intéressante de pouvoir être indicateur du milieu dans lequel elle se développe. Il ne semble pas dénué d'intérêt d'étudier ces plantes indicatrices avant de lutter pour les enlever des parcelles. (Pousset, 2017). Les indications obtenues dépendent également du climat. Les volumes de précipitations représentant un filtre au développement de certaines espèces, la flore spontanée peut permettre une approximation de l'état hydrique de la parcelle (Morel, 2003). Le tableau suivant répertorie les principales espèces des vignobles français. Il se base sur des relevés réalisés dans toute la France dont des vignes du pourtour méditerranéen (Gard).

Tableau 3 : Principales espèces végétales spontanées les plus représentées dans les vignobles français en pourcentage d'espèces la plus représentée parmi les vignobles étudiés (Gaviglio, 2022)

Espèces	% de l'espèce la plus représentée	Famille botanique
Érigéron/vergerette	100	Astéracées
Séneçon commun	99	Astéracées
Pâturin annuel	62	Poacées
Liseron des champs	59	Convolvulacées
Laitue scarole	52	Astéracées
Helminthie fausse vipérine	52	Astéracées
Géranium	46	Géraniacées
Porcelle enracinée	46	Astéracées
Épilobe à quatre angles	43	Onagracées
Laiteron rude	43	Astéracées
Plantain lancéolé	41	Plantaginacées
Luzerne tachetée	41	Fabacées
Ray-grass	36	Poacées
<i>Crepis</i> sp.	34	Astéracées
Carotte et torilis nouveaux	33	Apiacées

Ces relevés sont à compléter avec une flore plus spécifique. En annexe sont disposés deux tableaux des espèces végétales spontanées spécifiques à nos vignobles méridionaux français.

#### b. Développement phénologique des espèces

La classification de Raunkiaer (Raunkiaer, 1934) différencie les espèces végétales de notre inter-rang selon deux catégories de plantes. Les **géophytes** ayant une stratégie de réserve et possédant des organes de multiplication dans le sol. Ces espèces se multiplient au travers des rhizomes. Certaines espèces peuvent échapper au travail du sol à l'aide d'un système racinaire très profond tandis que d'autres vont profiter de la déstructuration du sol pour coloniser un peu plus leur milieu. Les **thérophytes** ayant une stratégie de reproduction survivent principalement par la production de semence déposée puis enfouie dans le sol. Elles passent la plupart du temps sous la forme de graines présentes dans le sol. La plante elle-même ne représente qu'un moyen pour pouvoir multiplier, renouveler et disséminer les semences (Chauvel et al., 2018). Nous allons développer plus en détail le développement phénologique de ces dernières.

La **germination** correspond à la sortie de dormance de la semence parmi laquelle nous distinguons deux grandes catégories : les organes issus de la fécondation telles que les graines des organes issus de la multiplication comme les rhizomes ou autres tubercules. La phase de germination peut se définir par une phase d'activation du métabolisme (Boiffin et al., 2020). Cette étape dépend énormément des conditions du milieu. En fonction des espèces, la somme de température ou un minimum d'humidité dans le sol sera nécessaire pour le bon départ de cette germination (Köchy & Tielbörger, 2007). L'activation du métabolisme de la plante et la consommation des réserves carbonées présentes dans la semence permettent d'initier le développement végétatif.

L'expansion en hauteur, ainsi que l'exploration du sol par les racines de la plante se nomme **la levée**. Il s'agit d'une période de développement des organes aériens mais également racinaire. Cette période va correspondre avec la fin de l'utilisation des réserves carbonées de la semence. La plante va commencer à la synthétisation de ces propres métabolites à l'aide de nutriments glanés par les jeunes racines. Pour cette étape, des sommes de températures ainsi que des volumes d'eau sont nécessaires, dépendant évidemment de l'espèce (Boiffin et al., 2020). Cette croissance du végétal se termine par la formation des organes reproducteurs.

**La floraison** constitue l'une des premières étapes de la reproduction des plantes. Par floraison on entend la formation des fleurs puis la fécondation. La plupart des plantes se reproduisent par allogamie ou autogamie avec en majorité une allogamie préférentiel. L'autogamie peut dans certains cas être rendue impossible par le décalage entre l'apparition des organes mâles et femelle sur une même plante (Chauvel et al., 2018). L'apparition de ces organes et la réussite de la fécondation sont extrêmement dépendantes des conditions du milieu, notamment les volumes de pluie. Il existe une corrélation positive entre les volumes de précipitation et les dates d'apparition des organes reproducteurs. L'apparition de pluie retarde la date d'apparition des fleurs (Spano et al., 1999). Les températures négatives induisent également des complications lors de cette étape. Le gel peut entraîner la mort des fleurs d'une plante ou la nécrose partielle. Cela implique ensuite la quantité de graines produites (Inouye, 2008). La fécondation des fleurs entraîne l'apparition des graines sur la plante.

Le **développement des graines** pour la plante représente le cœur de la stratégie des espèces thérophytes. En effet, les stocks de semences produits et disséminés contribuent à la survie de l'espèce. La capacité d'une espèce à produire des semences dépend de différents facteurs notamment de la capacité à réaliser le cycle phénologique en entier face aux événements climatiques (Debaeke & Sebillotte, 1988). Certaines espèces vont réaliser plusieurs cycles de reproduction durant une année permettant de disséminer plus de graine et à différentes périodes de l'année (Labreuche et al., 2014). Ces graines vont représenter le stock semencier de la parcelle. Elles vont permettre la formation et le développement de nouveaux individus. Cette nouvelle génération n'est pas spontanée et peut apparaître après une période de dormance.

La **dormance** consiste en une période de repos avant la germination pour la graine. Cette étape n'a pas de durée limitante. Elle peut durer plusieurs années si les conditions d'humidité et de température du sol, variant d'une espèce à l'autre, sont stables (Guyot & Massenet, 1950). Durant cette dormance, une période de vernalisation peut être nécessaire au bon déroulement d'un nouveau cycle. Cela consiste en une période de froid de durée et d'intensité variable selon les espèces (Chouard, 1960). Une fois toutes les conditions réunies les espèces peuvent se développer dans la parcelle.

#### c. Lien entre la diversité des espèces de l'inter-rang et la vigne

Les variétés semées dans le rang de vignes rendent des **services à la vigne** mais également au couvert lui-même. La diversité floristique représente un enjeu de taille dans la gestion des insectes sur le vignoble. Les espèces présentes peuvent permettre d'attirer une plus grande quantité et une plus importante diversité d'insectes pollinisateurs (Kratschmer et al., 2019; H. Wilson et al., 2018). Dans la description de la fécondation chez la vigne nous

avons évoqué le fait que celle-ci est avant tout autogame. Cependant, une importante présence de pollinisateur semble rendre des services dans la bonne réalisation de la fécondation et réduit les risques de coulures (McGregor, 1976). Les plantes de l'inter-rang peuvent également servir d'hôte pour des espèces auxiliaire permettant de réduire la pression de certain parasite (Fiedler et al., 2008). Néanmoins cette flore peut également servir de protection pour certain ravageur (Wermelinger et al., 1992). De nombreux services sont liés au sol, par la prévention de l'érosion ou le maintien d'une humidité, par exemple (Winter et al., 2018). Toutefois, l'installation d'un couvert végétal peut également servir d'amendement. L'installation d'un couvert hivernal contenant des fabacées, par exemple, semble influencer sur la disponibilité en azote minérale de la parcelle. Cela nécessite l'installation d'un couvert pour l'hiver avec broyage pour une restitution au sol au printemps (Fulchin, 2014; Gontier, 2015). Il faut cependant prendre en compte les contraintes imposées à la vigne par ce couvert végétal du rang/inter-rang.

Certains viticulteurs restent réticents à l'idée de voir cohabiter leurs vignes avec d'autres espèces dans le rang ou l'inter-rang. Nous pouvons commencer par évoquer une **concurrence hydrique**. La figure suivante présente les transferts hydriques au sein d'une parcelle à plusieurs périodes en fonction de deux modalités : rang enherbé et rang nu. Nous pouvons observer ici que le potentiel hydrique du sol de la modalité enherbé diminue plus rapidement dans le rang ainsi que dans l'inter-rang. Cette diminution peut accentuer les effets de la contrainte hydrique lors d'années particulièrement sèches.

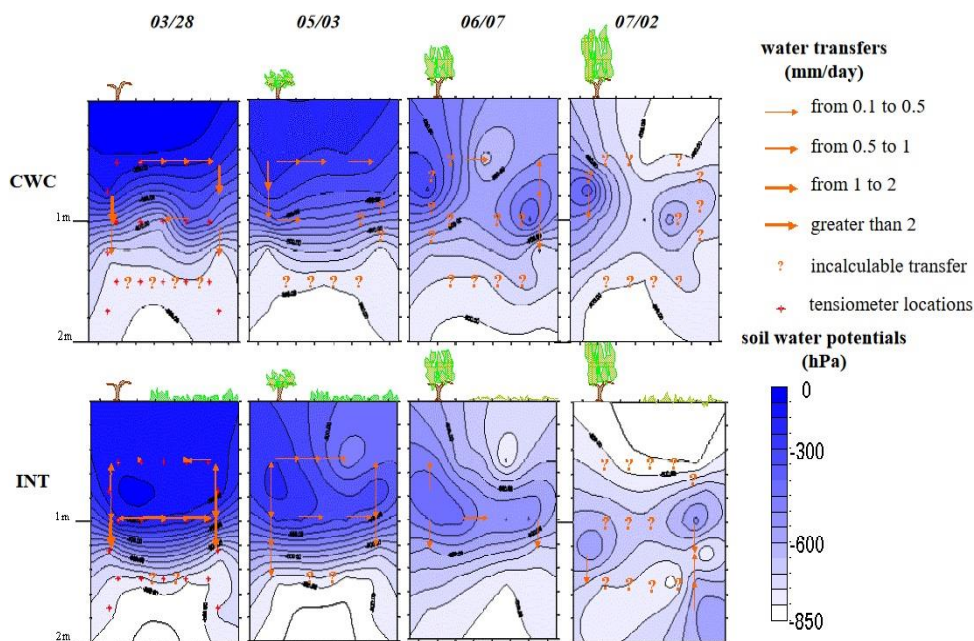


Figure 9 : Schéma de l'évolution des profils de charges hydriques dans le sol d'un rang enherbé (INT) et d'un rang nu (CWC) (Chantelot et al., 2004).

Pour ce qui est de la concurrence pour l'accès à l'azote minérale les débats divergent. Il semble avant tout important de comprendre que le couvert végétal se développe la plupart du temps avant la vigne. Ce développement asynchrone entraîné par la précocité du couvert sur la vigne renforce l'intensité de la concurrence pour la ressource dans la zone du sol exploré par les systèmes racinaires de ces espèces (Willey, 1990). Cette concurrence se poursuit tout le long du développement phénologique de la vigne. In fine, cela peut porter atteinte au bon

déroulement de certaines étapes clés pour la formation finale des fruits (Schaller et al., 1991). La présence d'une carence dans le fruit peut entraîner diverses complications lors des fermentations alcoolique, l'azote étant un composé consommé par les levures qui se chargent, entre autres, de transformer le sucre des baies en alcool.

#### d. Réponses aux changements climatiques

Parmi les différentes évolutions du climat présenté dans ce rapport **l'augmentation des températures** semble être celle qui affecte le plus la diversité végétale des vignobles. En effet, cela engendre une précocité dans l'apparition des stades phénologiques des espèces spontanées du rang. Ce développement précoce intensifie la compétition avec la vigne pour les ressources hydrique et azoté à des stades phénologiques cruciaux pour la culture (Thiery & Chucho, 2007). L'évolution à la hausse de ces températures représente également un filtre supplémentaire pour les espèces déjà implanté au profit d'espèces plus adaptées aux importantes chaleur (Vennetier & Ripert, 2010). Ces augmentations de température participe également à l'apparition de périodes de sécheresse.

Les **sécheresses** affectent également les espèces du milieu. En effet, la réduction de la disponibilité en eau de la réserve utile a des conséquences sur la plante entière. On constate une réduction de la surface foliaire et un étiolement des plants. Également, une allocation privilégiée de la biomasse vers les racines par rapport à la biomasse aérienne traduit par un ratio de biomasse racinaire dans la biomasse totale supérieur en situation de déficit hydrique (Moreau et al., 2019).

Si les périodes de froids prolongés, ou **gels**, présentes des avantages sur la vigne (vernalisation), ce n'est pas le cas des température négatives. Certaines espèces sont dites gélives, c'est-à-dire qu'une période de gel inhibe leur développement. Elles vont également se montrer favoriser par l'augmentation des températures et la disparition progressive des épisodes de gel précoce (Baudart, 2009)

#### 4. Viticulture de précision

L'idée du projet MOMAC d'automatisation, d'obtention et de la transmission des données autour d'un observatoire autonome des changements climatiques nécessite des outils technologiques récents. De l'acquisition de la données (dendromètre, sonde d'humidité, appareil photo) à sa transmission (utilisation d'un système LoRa, utilisation d'un réseau de données mobiles) cela nous rapproche du terme d'agriculture de précision. Ce concept né à la fin des années 90 correspond à l'intégration des nouvelles technologies et leur évolution dans l'optimisation de systèmes agricoles (Zwaenepoel & Bars, 1997). Concrètement nous cherchons ici à dériver ce concept afin de l'appliquer à l'étude des dynamiques temporelles de la biodiversité spontanée et cultivée, celle-ci jouant un rôle de sentinelle des impacts du changement climatique. Dans ce cadre, deux méthodes numériques seront développées dans cette partie. Dans un premier temps l'utilisation de l'imagerie sur la vigne avec l'analyse du feuillage et du développement des organes reproducteur puis des fruits. Dans un second temps l'utilisation de la dendrométrie pour attester de la croissance végétative du matériel végétal. Ces deux méthodes étant susceptibles de nous donner les informations nécessaires sur le développement de la vigne et sur les impacts des évènements climatiques sur la physiologie ainsi que sur la phénologie.

#### a. Utilisation de système d'imagerie en viticulture

Les premiers travaux autour de l'étude de l'imagerie visaient à repérer les nécroses d'une feuille (Lindow & Webb, 1983). C'est le début de l'utilisation de **systèmes d'imagerie**. Plus récemment, des travaux avaient comme ambition de caractériser le stade de développement des feuilles de vignes afin d'adapter la pulvérisation (Bediaf et al., 2013) ou afin de déterminer les maladies foliaires (Barbedo & Garcia, 2016; Bourgeon et al., 2015). Il existe maintenant des systèmes de mesure de la phénologie et de la vigueur de la vigne par acquisition d'images aérienne en utilisant des drones ou des photographies satellites (Pagliai et al., 2022). Cette liste non exhaustive de différents projets nous informe qu'il est possible d'étudier le développement de la vigne par le biais d'image numérique. Néanmoins, au sein du projet MOMAC, l'étude se porte autour de l'analyse du développement et du remplissage des baies à l'aide de photographie successive d'une même grappe. Pour cela nous devons définir la méthode de "convolutional neural network" (CNN) appliqué à la sphère viticole et qui correspond à l'aboutissement de plusieurs années d'étude de par le monde.

Le "deep-learning" représente l'une des sphères de l'intelligence artificielle. C'est-à-dire des systèmes permettant aux systèmes informatiques de résoudre des problèmes nécessitant auparavant une intelligence humaine. Les **CNN** représentent une manière d'entraîner des algorithmes à la prise de décision (Rusk, 2016). On utilise plus particulièrement ces derniers pour la différenciation de motifs au sein d'images numériques. On peut demander à ces systèmes de différencier des images entre elles ou bien de manière plus complexe de différencier des éléments entre eux au sein d'une même image. La qualité d'un modèle se juge par le taux de réussite à la détection ou à la reconnaissance des objets désirés. Cela dépend en grande partie de la qualité du panel d'images de références utilisées pour l'entraînement. Enfin, ces modèles peuvent être optimisés en continu si l'on ajoute en permanence de nouvelles images de références (Dong et al., 2021; Janiesch et al., 2021). Le nombre d'études lancées permettant de lier la viticulture à des systèmes d'imagerie ne fait que de croître depuis un peu plus de 10ans, témoignant de l'intérêt pour le sujet (Santesteban, 2019).

**L'observation des grappes** à l'aide de système numérique commença par l'automatisation de l'analyse du raisin à l'aide de CNN pour étudier la compacité des baies entre elles sur une même grappe. L'origine de ces travaux portait sur les différences entre les différents cépages et permettait de mettre un point de départ à l'utilisation de CNN sur la vigne en commençant par analyser et par différencier les grappes entre elles (Cubero et al., 2015). Les travaux se sont d'abord concentrés sur des essais en milieux contrôlés. C'est-à-dire, en laboratoire ou avec la présence d'un filtre en arrière-plan des grappes afin d'éliminer la présence du fond et ses effets négatifs sur la reconnaissance (Hacking et al., 2020). Ensuite, comme le montre la figure les travaux se sont portés sur l'utilisation de ces algorithmes en conditions réelles. La photographie permet de montrer des grappes reconnues de manière automatique par un modèle d'intelligence artificielle. Nous sommes en mesure de compléter cela avec des travaux réalisés sur l'étude de la myrtille et notamment sur la possibilité de repérer les différences de maturité entre les baies d'une même grappe (Ni et al., 2020). L'entraînement d'un modèle permettant de différencier les baies au sein d'une grappe se révèle alors possible et ouvre de nouvelles opportunités.

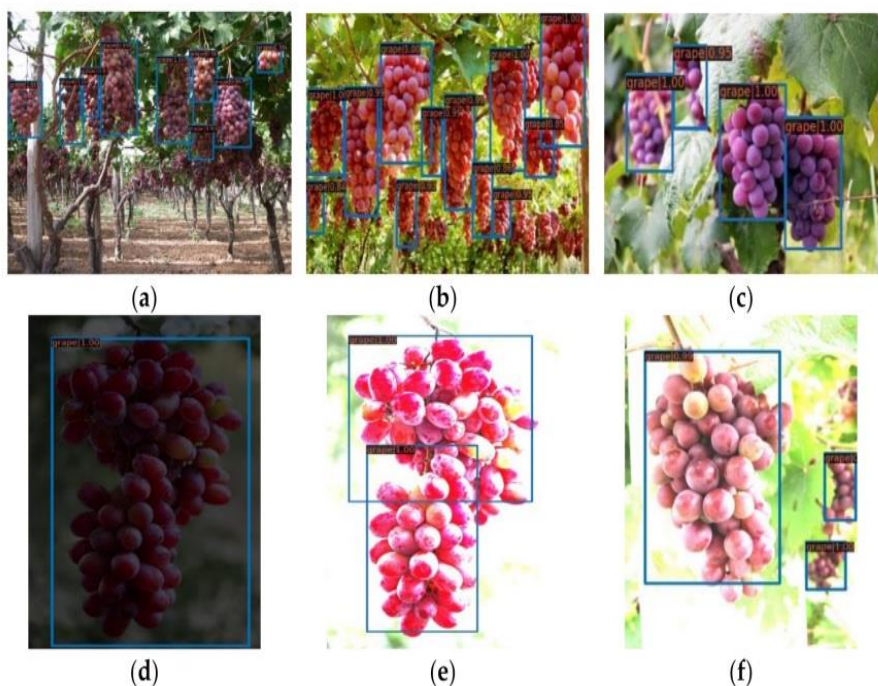


Figure 10 : Photographies de grappes de raisin reconnus en conditions réelles par un algorithme d'intelligence artificielle (Wang et al., 2021)

L'apparition de ces innovations en matière d'imagerie fait naître des idées. Des scientifiques vont alors réaliser et entraîner un modèle permettant de compter le nombre de baies par grappe. Ce modèle possède un pourcentage de réussite de **l'identification des baies** compris entre 85 et 94% (Zabawa et al., 2019). La réalisation de ce modèle ouvre la voie à l'étude des baies et de leur fonctionnement.

Une fois les baies identifiées sur la grappe de nouvelles opportunités voient le jour. Les problématiques principales résident maintenant dans le fait de pouvoir déterminer efficacement la taille de ces baies (Zabawa et al., 2020). L'analyse de la **taille des baies** à l'aide d'image ouvrirait de nouveaux horizons dans les systèmes d'imageries notamment dans l'analyse des variations journalières de la tailles des baies (Lou et al., 2016). Ces variations étant corrélés à l'état hydrique de la plante à la manière des variations de diamètre des rameaux.

#### b. Utilisation du deep learning pour l'étude de la biodiversité végétale

Il existe également des modèles d'intelligence artificielle utilisée de manière plus courante et par un plus large spectre de personne. Dans cette partie il semblait important de mentionner l'utilisation de PlantNet. Il s'agit d'une plateforme participative de reconnaissance d'espèces végétales (Affouard et al., 2017). On peut considérer PlantNet comme une intelligence artificielle permettant de reconnaître, avec plus ou moins de fiabilité, l'espèce végétale sur une photographie. Dans le cas de PlantNet, il s'agit d'un système de deep-learning que l'on peut nommer de participatif puisque les utilisateurs vont contribuer également à l'ajout de nouvelles données (des images d'espèces végétales) permettant d'alimenter le processus de reconnaissance (Barthélémy et al., 2014). Ce système présente également un intérêt dans le cadre du projet puisqu'il peut permettre de repérer les espèces végétales au sein de notre parcelle.



c. La dendrométrie pour l'étude de la croissance du végétal

La **dendrométrie** fait référence à la mesure de la variation du diamètre. On peut l'utiliser sur différent type de support tels que des troncs ou des branches. Pour cela un étrier sert de support autour de l'organe à étudier avec un palpeur plaqué contre celui-ci à l'aide d'un ressort. L'instrument va renvoyer une mesure de tension lié à l'intensité plus ou moins importante du ressort. Cette tension permet de mesurer, avec une précision liée au type de palpeur utilisé, la variation du diamètre du végétal. En effet, lorsque le végétal croit le palpeur va être repoussé vers l'extérieur puisqu'il se trouve plaqué en permanence contre la branche ou le tronc. A l'inverse lorsque le diamètre de l'organe va diminuer le palpeur va être attiré vers l'intérieur car poussé par un ressort. Une centrale d'acquisition permet de stocker cette variation. Le dendromètre transforme ensuite cette tension en interne pour pouvoir la traduire en une mesure de taille (en cm ou mm).

La **variation du diamètre** d'un tronc ou d'une branche d'un végétal correspond à une réponse aux contraintes environnementales. Premièrement il faut savoir que des variations significatives sont observables dans la journée permettant de distinguer deux périodes. La première, la phase diurne correspond à une diminution du diamètre du végétal. La seconde, la phase nocturne correspond à une croissance du diamètre du végétal. On peut alors observer une croissance du végétal lorsque durant la phase nocturne le diamètre revient au stade initial au début de la phase diurne tout en continuant à croître (Lamacque et al., 2020). Le graphique suivant permet de visualiser ces variations journalières entre les deux phases. Il permet également de remarquer l'impact de l'apport en eau sur la croissance du végétal.

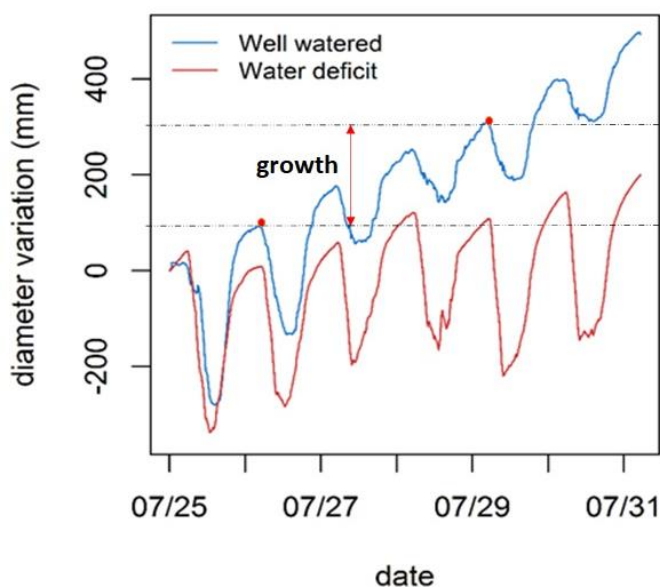


Figure 11 : Graphique des variations du diamètre de branches de pommiers. En rouge un pommier subissant un stress hydrique et en bleu un pommier sans stress hydrique (Pallas et al., 2018)

Il existe également un effet de la saison dans les variations de diamètre d'un tronc ou d'une branche. La période estivale entraîne généralement une chute du diamètre de l'organe mesurée. Sur le graphique suivant on peut observer une augmentation du diamètre sur la période printanière jusqu'à mi-juin. On remarque ensuite une chute du diamètre jusqu'à mi-juillet puis une stabilisation durant le mois d'août. On identifie une légère augmentation fin août. Le diamètre observé mi-juillet avant la stabilisation du mois d'août reste supérieur au diamètre de l'organe fin avril. On peut donc dire qu'il y a une croissance du végétal.

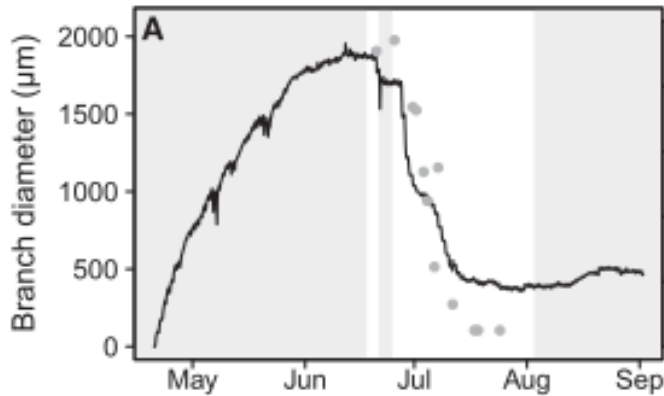


Figure 12 : Grapique de l'évolution du diamètre d'une branche de fin avri à fin aout (Lamacque et al., 2020)

## C-Problématisation

### 1. Hypothèses du sujet

Le précédent état de l'art permet de relever différentes hypothèses pour la réalisation d'un observatoire dispositif colocalisés des variables climatiques, édaphiques, phénologiques et taxonomiques au sein d'une parcelle de vigne. Ces hypothèses fondamentales permettent de justifier la mise en place et le développement de ce prototype. Ces sont ces hypothèses qui vont permettre de formuler la problématique générale de ce rapport. Elles sont nées de la confrontation de l'état de l'art avec les différents éléments du contexte du projet MOMAC. Le projet étant pluri-annuel certaines hypothèses ne pourront pas être validées (ou invalidées) à l'issu de ce stage. Néanmoins la réalisation de ce mémoire va permettre d'éclairer les différentes parties prenantes sur les difficultés rencontrés et sur les points de vigilance pour les années à suivre.

#### d. Suivi du développement végétatif et du développement des baies

Le climat régit le développement végétatif et phénologique de la vigne. Nous savons que les stades phénologiques sont dépendants des conditions climatiques. Ces dernières vont avoir un impact important sur la bonne succession des stades au cours de l'année. Toutefois, il peut paraître compliqué d'identifier et d'attester avec certitudes des dates d'apparition des premiers signes annonciateurs de ces stades. Nous nous interrogeons sur la possibilité d'observer la succession du développement végétatif et phénologique de la vigne. Pour cela nous utiliserons différentes caméras et différents réglages afin de s'approcher au plus près de la vigne tout en respectant les contraintes initiales du projet que sont l'autonomie et la faible consommation en énergie. Nous utilisons également des caméras pour pouvoir observer plus précisément certains organes de la vigne à savoir les boutons floraux, les inflorescences puis le développement des grappes. Les travaux en cours sur l'utilisation de système d'imagerie, au sein même du projet MOMAC, permettent aujourd'hui d'identifier automatiquement les baies au sein d'une grappe compacte à utilisant un CNN pré-entraîné. Ce système de deep-learning va même jusqu'à identifier le volume des baies d'une photographies. Nous allons essayer de vérifier avec ce prototype s'il est possible d'automatiser la prise de données, les photographies, pour le suivi du volume des baies.

**Est-il possible de suivre le développement de la vigne à distance, végétatif et des organes, à l'aide de caméras et de modèle entraînés ?**

e. Suivi du développement de la biodiversité du milieu interstitiel

Une partie de ce rapport est consacré pour le moment au suivi de la biodiversité végétales. C'est-à-dire les espèces qui cooccurrent dans le rang avec notre plante cultivée, la vigne. L'utilisation de l'imagerie permet, à l'aide de PlantNet, d'observer et d'identifier les espèces végétales sur une photographie. Un algorithme permet également d'identifier plusieurs espèces au sein d'une même photographie. En ayant recours à un dispositif de caméra dirigé vers le sol nous allons vérifier s'il est possible d'observer la succession des espèces au sein du rang. Si nous pouvons attester des dates des stades phénologiques telle que la levée de dormance, par exemple.

**Peut-on observer la succession d'espèces de l'inter-rang en utilisant un algorithme d'intelligence artificielle ?**

f. Corrélation des variables climatiques et des observations du développement de la vigne

La corrélation des données représente également un point important de ce prototype. En effet, il n'y aurait rien de nouveau à récolter uniquement des données climatiques ou des données sur le développement végétatif/phénologique de la vigne. Le véritable intérêt réside ici dans la corrélation de ces dernières informations à une échelle réduite. Les capteurs se situent autour d'un même pied de vigne dans un espace de quelques mètres carrés. Nous émettons l'hypothèse que la colocalisation des capteurs pour la réalisation de l'observatoire permet de corréler les informations obtenues. Nous nous sommes informés sur les effets des événements climatiques sur la vigne. Nous confronterons les résultats obtenus, en matière climatique mais également pour ce qui est du suivi de la plante, avec les conclusions de la littérature.

**Les données sur la croissance du végétale et les successions d'espèces sont-elles corrélables aux données climatiques obtenues par une station météo localisée ?**

**2. Problématique générale**

Les hypothèses évoquées nous amènent à établir une problématique générale. Pour cela nous avons identifié les enjeux de cette étude au sein du projet MOMAC : l'étude des changements climatiques, leurs effets sur la culture et la diversité végétale associée. Ce projet a pour but de mettre en place une station d'observations colocalisées des effets du changement climatique sur la vigne et sur la diversité végétale du milieu interstitiel. Le principe de l'étude consiste à réaliser un observatoire de la vigne et de la diversité floristique capable de fournir des données utilisables par les différents algorithmes de traitement. Les données traitées obtenues devront ensuite être corrélables avec les changements climatiques.

**Est-il possible de démontrer la faisabilité d'un observatoire de suivi, de traitement et de communication des données de variables édaphiques, climatiques, phénologiques et végétatives colocalisées à la vigne et à la diversité floristique de l'inter-rang ?**

**D-Identification de la mission personnelle**

L'objectif de la mission personnelle consiste à participer à l'instrumentation du vignoble de La Gaillarde au sein du WP 1. C'est-à-dire, la réalisation et le développement d'un outil d'observation conjoint de la phénologie de la vigne et de la biodiversité végétale du milieu

interstitiel. L'intitulé du stage étant : "Du capteur au site web..." le stage intégrera la communication des premiers résultats. Les deux UMR présentées précédemment, LEPSE et LISAH, encadrent ce stage.

## **1. Instrumentation de La Gaillarde**

Dans le cadre du WP1, l'instrumentation du vignoble de La Gaillarde, ce stage de fin d'étude consiste à faire une preuve de concept d'observatoire autonome. La création de ce prototype passe par la réhabilitation du vignoble de La Gaillarde.

La réhabilitation du vignoble consiste à intégrer des capteurs permettant de mesurer certaines variables édaphiques et climatiques de notre environnement. L'acquisition de variables édaphiques permet l'analyse de l'évolution de l'état du sol. L'objectif sera d'acquérir des valeurs d'humidité du sol, de sa température ainsi que de sa conductivité. Avec l'obtention de ces informations nous pourrions les relier à des indicateurs agronomiques de l'état du sol. Notamment la réalisation d'un bilan hydrique simplifié. A savoir que la réalisation d'un bilan hydrique sur le vignoble de La Gaillarde reste extrêmement difficile et imprécise car il s'agit d'un vignoble entièrement artificialisé. De plus la parcelle est irriguée, il semble difficile d'analyser les dynamiques de variations de l'humidité du sol en réponse à des changements climatiques tels que les vagues de chaleur ou l'augmentation des températures.

Actuellement le vignoble dispose d'une station météo permettant d'obtenir des informations sur la température de l'air, l'humidité relative, le rayonnement global et les précipitations. Ces données sont disponibles sur le site intranet de l'INRAE Supagro. L'ajout d'hygromètre et de capteur de rayonnement sur notre station d'observation risque de paraître délicate sur le vignoble de La Gaillarde car nous avons déjà les données nécessaires mais aura son importance sur les autres vignobles.

## **2. Traitement des données obtenues**

Les différentes variables climatiques et édaphiques obtenues feront l'objet d'un traitement. L'objectif sera de calculer à partir de ces données, pour la plupart déjà exploitable en tant que telle, de nouveaux indicateurs. Ces indicateurs seront intégrés dans un bilan hydrique simplifié de la vigne. Les données images seront traitées en utilisant les différents algorithmes mis à disposition. Les photographies du sol serviront à établir une liste de la diversité et de la densité des espèces végétales présentes dans le rang. Cela sera obtenu en utilisant un algorithme fonctionnant avec la base de données PlantNet. Les photographies des grappes seront traitées à l'aide d'un algorithme d'identification des baies. L'objectif sera également, pour les développeurs de cet algorithme, de vérifier si leur programme permet de mesurer le volume des baies. A l'aide des photographies de la plante entière nous essaierons de réaliser un suivi de la croissance de la canopée. Enfin, l'intérêt sera également de vérifier si l'on observe des corrélations entre les événements climatiques et la croissance du végétal.

## **3. Présentation des résultats**

La dernière partie de cette étude correspond à la communication des résultats. L'intitulé du stage étant : "Du capteur au site web...". La fin de cette étude portera sur la présentation des variables climatiques et édaphiques sur une interface web interactive. Par interactive on entend qu'il sera possible d'avoir des interactions avec les graphiques présentés.

## II – MATERIEL ET METHODES

### A-Description du site d'étude

#### 1. Présentation de la parcelle

La parcelle (figure) se situe au cœur du campus de l'Institut Agro de Montpellier. Elle voit le jour il y a une vingtaine d'année à des fins expérimentales et pédagogiques (cf : La Gailarde). Elle se compose de 4 parties distinctes les unes des autres. Chacune des parties comporte une ou plusieurs planches. Une planche contient une succession de rangs de vigne plantés selon un axe nord-sud. Les planches sont séparées par une porte, une ouverture dans le rang d'environ 1m de largeur permettant de circuler aisément entre les rangs. Elles comportent 20 rangs de 3 piquetées, une plantation de 5 pieds de vigne greffé d'un même cépage.

La première en vert sur le plan correspond à la **collection ampélographique** sur les 5 première planche entre les rangs numéros 1 et 20. Il s'agit d'une collection de cépages internationaux. Les planches 1 et 2 correspondent aux cépages blancs. Les planches 3 et 4 regroupent les cépages rouges. La planche 5 contient des cépages anciens qui ne sont aujourd'hui plus utilisé en viticulture traditionnel. Au sein de cette collection nous avons disposé notre système d'étude.

La seconde partie en orange contient les **modes de culture**. Dans cette zone nous retrouvons uniquement le cépage Syrah mais selon différent mode de conduite. Les modes de conduites représente la forme que l'on souhaite donner à notre vigne en la taillant. Ici, nous pouvons retrouver de la vigne en gobelet ou même en pergola. Une expérimentation est en cours sur de la vigne en taille minimale. Certains rangs ont été arraché pour pouvoir implanter et étudier des variétés résistantes.

La troisième partie en jaune se nomme la **pépinière**. Il s'agit d'un espace de culture hors sol utilisé dans de nombreuses expérimentations. Les vignes sont plantées en pot et de nombreux appareils précis de mesure de l'apport en eau ou du poids des pots sont installés permettant d'étudier les différents échanges entre le végétal et son milieu. On peut également citer des expérimentations menées sur l'impact de l'ombrage d'une partie de la plante sur l'orientation du feuillage réalisé dans cette espace du vignoble.

La dernière partie, en bleue, correspond à la **collection de porte-greffes**. De nombreux porte-greffes sont répertoriés entre les planches 6 et 7 du vignoble. Les portes-greffes sont la partie racinaire de la vigne. Il s'agit d'espèces différentes que *Vitis vinifera* cultivé pour la production de raisin de table ou de cuve.

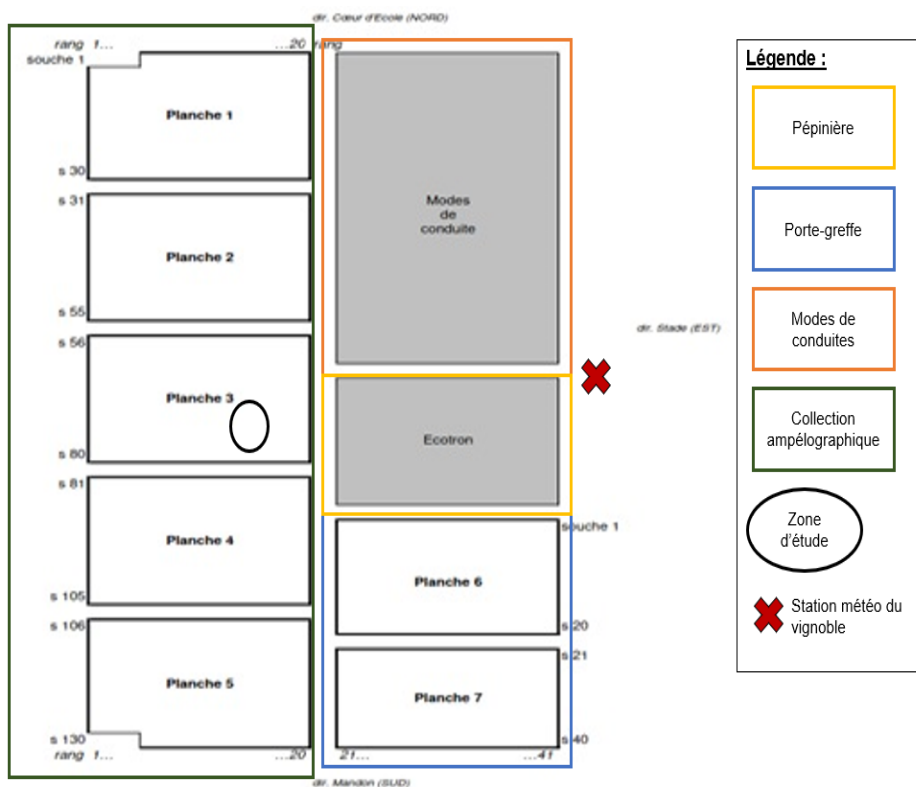


Figure 13 : Plan du vignoble expérimental et identification des différentes zones (A. Fribault)

## 2. Le matériel végétal

La zone entourée en noir sur le plan précédent correspond au rang 17 de la planche numéro 3. Il s'agit d'un cépage rouge utilisé dans différentes régions françaises : le Cabernet Sauvignon. Nous avons décidé d'utiliser ce cépage dans un premier temps car sa position dans le vignoble est idéal : caché par d'autres rangs nous autorisant à laisser certains outils sur place en ayant moins de craintes des vols. Un tel cépage est également bien connu des différents organismes de l'étude et comporte moins de secret que certains cépages plus exotiques. La plantation a été réalisée au moment de la création de cette parcelle artificielle au cœur de l'Institut Agro de Montpellier. Notre système se situe à une altitude de 40m au-dessus du niveau de la mer.

## B-Description du dispositif

Ce prototype d'observatoire comporte différents capteurs permettant d'observer l'environnement du vignoble à l'échelle du plant de vigne. Nous avons installés des capteurs de variables climatiques sous la forme de capteur de rayonnement ou d'hygromètre par exemple. Nous avons également installé le nécessaire pour acquérir des variables édaphiques telles que la température ou l'humidité du sol. Enfin des caméras ont été installées pour observer la vigne dans son ensemble mais également à l'échelle de la grappe.

## 1. Photographie

Pour l'acquisition des photographies pour l'analyse du développement végétatif de la vigne deux systèmes sont utilisés, une solution commerciale autonome Bolyguard et une caméra autonome lié à un système Raspberry.

### a. Bolyguard

Les caméras Bolyguard (figure) sont des solutions commerciales autonomes utilisées principalement pour la captation d'image d'animaux sauvages. En effet, ces outils proposent différentes solutions dont un détecteur de mouvement qui permet de prendre une photo lors du passage d'un objet devant le détecteur. La solution qui nous intéresse dans ces caméras correspond à la fonction time lapse. Ces caméras sont programmées pour prendre plusieurs photos chaque jours à des horaires très précises à savoir 8h, 14h et 20h. A l'aide d'une carte SIM, en utilisant un réseau de données téléphoniques, les images sont envoyés sur une adresse mail. Ces caméras sont aujourd'hui alimentées par un panneau solaire permettant d'obtenir une autonomie complète sur la période du stage.



Figure 14 : Photographie des caméras Bolyguard (A.Fribault)

### b. Raspberry-Pi

L'utilisation des caméras Bolyguard souleva rapidement différentes problématiques autour de l'acquisition d'image. Si les solutions commerciales permettaient de répondre à une partie de la problématique, à savoir des capteurs autonomes et avec une faible consommation en énergie, nous rencontrions tout de même des difficultés. Il ne nous était pas possible d'obtenir des images plus précises des organes de la vigne (fleurs et grappes). De plus nous ne pouvons pas modifier les réglages de la Bolyguard pour satisfaire nos besoins.

Nous avons recours, en plus du système Bolyguard en place, à l'utilisation d'une caméra ajoutée à un processeur Raspberry. Cela nous autorise différentes subtilités. Nous pouvons utiliser différents objectifs permettant d'effectuer des essais sur les résolutions ou les distances optimales pour l'obtention d'images utilisable par les différents algorithmes. La carte Raspberry nous permet d'obtenir les données directement sur un serveur partagés conçus pour l'occasion. L'utilisation du processeur couplé à un élément externe nommé Witty permet de réduire drastiquement les consommations en énergie.

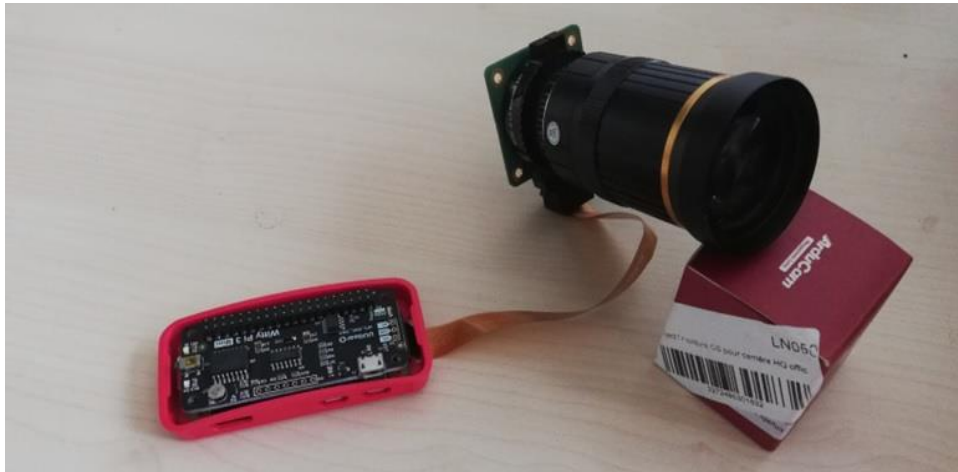


Figure 15 : Photographie du système de caméra Raspberry (A.Fribault)

## 2. Terros 12

Le système de mesure des variables édaphiques se nomme **terros 12**. Il s'agit d'une sonde de mesure de la conductivité du sol, de l'humidité et de la température. Cette sonde est développée par le groupe METER©. Elle a été ajoutée à un boîtier d'alimentation (figure) contenant une pile lithium et un panneau solaire. La batterie permet d'assurer une autonomie partielle au système et le panneau solaire permet de la recharger. De cette manière nous obtenons un système avec une faible consommation en énergie et qui peut rester en place une saison entière. Le boîtier d'alimentation contient également un système de transmission des données via un réseau Long Range (LoRa). Il s'agit d'un protocole de communication utilisant des ondes radios et permettant de transférer des données de faible volume à un moindre coût en énergie. L'utilisation de ce réseau permet d'obtenir les acquisitions des capteurs directement sur un serveur associé. Ce capteur terros 12, lié au boîtier d'alimentation et de télécommunication, représente un système autonome sur l'acquisition et l'envoi des données à un faible coût énergétique.





Figure 16 : Photographie du boîtier d'alimentation et de transmission de la sonde Terros 12 (A. Fribault)

Les données récupérées sur le serveur sont sous la forme d'un fichier texte organisé en colonne. Chaque colonne représente les différentes acquisitions. Cela correspond à l'humidité, la conductivité et la température du sol. La sonde est située à 15cm de profondeur à une distance de 10cm du poteau. Ce dispositif permet d'acquérir et de transmettre des données à un pas de temps de 10min. La télétransmission s'effectue à la suite de l'acquisition des données permettant toutes les 10min d'obtenir une nouvelle mesure. Dans le fichier de présentations des mesures nous pouvons également retrouver l'état de la batterie nous indiquant si la pile se recharge ou est défectueuse et le cas échéant nous permettant de prédire un remplacement.

### 3. Dendrométrie

Les utilisations possibles d'un **dendromètre** ont été évoqués lors de l'état de l'art. Pour cette étude nous avons décidé de placer deux appareils sur notre pied de vigne. Ces deux appareils sont situés sur deux branches différentes. Sur la photographie (figure) on remarque qu'un étrier entoure la branche en maintenant une sonde appuyée contre elle. Les variations du mouvement de cette sonde se traduisent sous la forme de variation de tensions. Un boîtier de collecte permet ensuite de récupérer ces variations et les transforment en une mesure de diamètre. L'acquisition des données se fait automatiquement avec un pas de temps de 10min entre chaque mesure. Toutefois, la transmission des données n'est pas encore automatisée. Les dendromètres nécessitent une intervention pour pouvoir récupérer les mesures. Il faut se connecter au boîtier de collecte avec le logiciel HoboWare pour pouvoir récupérer les données.



Figure 17 : Photographie de l'un des deux dendromètres du pied de vigne étudié (A. Fribault)

#### 4. Hygrométrie et rayonnement

Nous avons ajouté à l'observatoire, à côté du pied de vigne ciblé par les caméras et de la sonde Terros 12 dans le sol, des instruments de mesures du rayonnement (pyranomètre à gauche sur la figure) et de l'humidité relative (hygromètre à droite sur la figure). Ce dispositif est lié au même système d'alimentation et de transmission que la sonde Terros 12. Ce boîtier utilise également un protocole LoRa pour transmettre les données.

L'**hygromètre** est un appareil de mesure de l'humidité de l'air. Dans notre cas il s'agit de la sonde Hygrovu10 de chez Campbell©. Elle se compose d'une sonde de mesure de l'humidité relative de l'air dite capacitive. Deux électrodes sont situées de part et d'autre d'un matériau. La tension en eau de l'air induit des variations dans la permittivité de l'objet. Ces variations sont mesurées par les électrodes et traduites en variation de l'humidité relative de l'air. Les mesures sont obtenues avec un pas de temps de 5min. Les données sont ensuite disponibles sous la forme d'un pourcentage d'humidité relative moyen

Le **pyranomètre** correspond à un appareil de mesure d'un flux thermique. Nous avons installé le CS320 de chez Campbell©. Il mesure les différences de température entre deux zones noire et blanche au sein du capteur. Un calcul est ensuite réalisé pour traduire cette différence de température en une intensité de rayonnement. Ce résultat correspond à une mesure de l'intensité lumineuse des ultra-violets (300nm) jusqu'au proche infra-rouge (2500nm). Le pas de temps est le même que pour l'hygromètre. Les données sont disponibles sous la forme d'un rayonnement (en  $W.m^{-2}$ ).



Figure 18 : Photographie de l'hygromètre et du pyranomètre sur le vignoble (A.Fribault)

## 5. Station météo

La **station météo** (figure) présente actuellement sur le vignoble date de la réhabilitation du vignoble dans le début des années 2000. Elle comporte différents instruments. Un pyranomètre et un hygromètre dont les fonctionnements sont déjà décrits dans ce rapport. Les données de température, rayonnement globale, vitesse du vent, pluie et humidité relative sont disponibles à l'heure. Néanmoins il reste possible d'obtenir des moyennes journalières puis hebdomadaires, mensuelles ou annuelles. Ces données sont envoyés sur un serveur interne à Supagro en utilisant un réseau WiFi.

Un anémomètre qui permet de mesurer la vitesse du vent. Sur notre station il s'agit d'un anémomètre à coupelle. Trois hélices possédant à leur extrémités une coupelle sont reliés ensemble avec chacune un angle de 120 degrés par rapport aux autres. Le vent fait tourner cet instrument qui entraîne un compte tour enregistrant la vitesse de rotation. Cette vitesse de rotation est ensuite corrélée à la vitesse du vent.

Un pluviomètre permettant de mesurer le volume de précipitation. Dans notre cas il s'agit d'un pluviomètre à auget. Un entonnoir collecte et entraîne la pluie à l'intérieur du système. Celui-ci est composé d'un auget, un petit bassin collecteur d'eau effectuant un balancier. Une formule mathématique permet ensuite de corrélérer le nombre de balancement de cet auget à un volume d'eau. Ce volume d'eau correspondant à notre volume de précipitation sur une période donnée.

Une sonde de mesure des températures permet d'obtenir des valeurs de température minimale, maximale et moyenne. Les valeurs maximales et minimales ne sont disponibles que lorsque l'on choisit le pas de temps journalier.



Figure 19 : : Photographie de la station météo (A.Fribault)

## C-Suivie des données

### 1. Stades phénologiques

#### a. Echelle BBCH

Dans l'annexe 1 nous pouvons trouver la table des stades phénologiques selon différentes échelles dont notamment l'échelle BBCH. Cette table sert de repère afin d'identifier les différents stades phénologique au sein d'un vignoble et permet d'attester du développement de la vigne. En suivant cette table nous pouvons observer la sortie des feuilles, leur développement ainsi que leur croissance. Nous pouvons également établir et noter les périodes relatives à l'apparition des inflorescences puis des grappes. Cette échelle est intéressante car elle permet de suivre le développement phénologique de la vigne durant toute une saison de la sortie de dormance en début d'année jusqu'à la chute des feuilles en fin d'année après la récolte.

#### b. Méthode d'acquisition des photographies

La **caméra Bolyguard** nous permet d'acquérir des photographies du plant de vigne en entier. En effet, cette solution commerciale se montre parfaite pour pouvoir observer le feuillage dans son intégralité. Nous avons incliné la caméra de telle sorte que même avec une forte croissance des rameaux nous pourrions toujours garder dans le cadre de l'image le feuillage dans son intégralité. La programmation de la caméra permet de prendre d'acquérir des photographies 3 fois par jour à heure précise avec 6h de décalage. Les 3 acquisitions se déroulaient à 8h30, 14h30 et 20h30. Ces images ont une résolution de 36 millions de pixels avec 6912 pixels de hauteur et 5184 pixels de largeur.

Le **système de caméra Raspberry** nous permet de s'approcher au plus près de la grappe. La monture présente sur le système d'acquisition des photographies permet de monter différents objectifs sur l'appareil. Ces différents objectifs ne modifie pas la résolution

de l'image, il s'agit d'une composante de la caméra initiale, mais ils modifient l'entrée de la lumière vers le système d'acquisition modifiant ainsi le niveau de zoom. Grâce à ces subtilités nous avons réussi à obtenir une image de la grappe avec la meilleure résolution possible. Ces images des grappes étaient prises tous les jours depuis le 11/05 jusqu'au 28/07. La résolution de ces images est de 8 millions de pixels avec 2484 pixels de hauteur et 3280 pixels de largeur.

#### c. Stockage des données

Nous dirigeons toutes les photographies captées par nos différents instruments vers le même lieu de stockage. Il s'agit d'un drive participatif entre les membres du projet MOMAC relié à un **serveur de stockage interne** à l'une des UMR du projet. Les photographies de la caméra Raspberry sont envoyées directement sur ce serveur suite à leur acquisition, si la connexion le permet, sinon elles sont stockées en interne dans la carte SD de l'appareil puis envoyées lorsque la connexion le permet. Les photographies de la caméra Bolyguard sont envoyées sur une boîte mail liée au projet subitement après leur acquisition. Un transfert manuel permet de les ajouter sur l'espace dédié.

## 2. Remplissage des baies

Les photographies obtenues à l'aide du système Raspberry aident à l'obtention d'une résolution suffisante autour des grappes. Contrairement à la caméra Bolyguard qui possède une résolution générale plus importante mais présente beaucoup plus d'éléments dans ses photographies. Ces images vont nous permettre d'étudier le remplissage des baies au cours de la saison. Pour cela, dans un premier temps nous devons être capable d'identifier les baies les unes des autres sur une grappe. Ensuite, il faut être capable de calculer un volume à partir de ces baies identifiées.

#### a. Identification des baies sur la grappe

Des collègues partenaires du projet au sein de l'UMR AGAP (Amélioration génétique et adaptation des plantes) travaillent autour de la réalisation d'un algorithme d'identification des baies de raisin au sein d'une grappe.

Dans un premier temps, ils ont entraîné un CNN à l'aide de nombreuses images de grappe. Cela nécessite d'avoir une banque de données contenant de nombreuses images de grappes. Plus il y a d'images différentes plus le système sera entraîné. L'exercice consiste à réaliser, sur chacune des images, des boîtes autour des baies. Cela demande un logiciel spécialisé, il en existe plusieurs. Cette étape se nomme la labélisation des images. Ces boîtes représentent un indicateur. Elles indiquent deux choses : cette partie de l'image contient une baie mais aussi que les autres parties de l'image (sauf présence de plusieurs boîtes dans l'image) ne sont pas des baies.

Ensuite, lorsqu'ils estiment avoir entraîné un nombre suffisamment important d'images l'étape suivante commence. Il s'agit de la validation, en utilisant d'autres images de la banque de données initiale il faut essayer le modèle construit. Les images utilisées pour la validation ne doivent pas être les mêmes que celles utilisées pour l'entraînement. Lors de cette étape nous vérifions si les résultats obtenus par le modèle sont cohérents. C'est-à-dire s'il est capable de reconnaître de lui-même les objets préalablement définis au sein de nos boîtes. Dans notre cas, si sur une grappe il identifie distinctement les baies. Un pourcentage de fiabilité s'inscrit à côté des boîtes présentes sur les images lors de la validation. L'objectif consiste à obtenir un pourcentage de fiabilité le plus élevé possible.

Enfin une fois le modèle entraîné et validé il peut être utilisé sur de nombreuses autres images. Dans notre cas le modèle de reconnaissance des baies est entraîné pour reconnaître la présence et identifier distinctement les baies sur une grappe. Il peut être utilisé sur des photographies de grappes en laboratoire présentant un fond unicolore. Il peut également être utilisé sur le terrain. C'est-à-dire avec des photographies de grappes encore sur le pied sans la présence d'un fond unicolore. Il autorise également la reconnaissance de baies sur des grappes différentes du moment que la résolution de l'image accordée à chacune des grappes est suffisante.

#### b. Etude des variations du volume des baies

La distinction des baies sur une grappe permet d'initier le calcul du volume de la baie. Des mires sont également disposées sur la grappe. Souvent sous la forme de perle de mensurations connues. Ces mires doivent servir de référence pour pouvoir calculer ensuite le volume des baies. Ensuite, à partir des b Pour cela un algorithme supplémentaire va réaliser des filtres, de forme ellipsoïdale, autour des baies afin d'être certain de ne prendre en compte dans le calcul du volume uniquement la baie. De cette manière cela permet d'extraire l'environnement extérieur à la baie. Une fois l'ellipse déterminer l'algorithme va réaliser un ratio entre les pixels de l'ellipse et les pixels de la mire présente sur la grappe. Ce ratio permet d'avoir un aperçu de l'aire de la baie présente sur l'image induisant ainsi le calcul du volume.

Cependant un problème se pose pour les baies partiellement cachées, par le feuillage ou par d'autres baies, reconnus par le CNN de détection des baies. Si la majorité de la baie est visible l'ellipse pourra se former autour de la baie et il sera donc possible de calculer son volume. Les cas où la majorité de la baie ne se rend pas visible sur la photographie peuvent rapidement induire des erreurs dans la formation de l'ellipse et in fine dans le calcul du volume.

La mesure du volume des baies se fait en **voxel**. Il s'agit d'une unité comprenant trois dimensions. On peut lire que le voxel représente une unité en "3 dimensions" dans le sens où elle stock un volume. Cela se base sur le calcul d'une projection à l'aide d'un algorithme de reconstitution des volumes (Lewitt, 1992).

### 3. Suivi de l'état hydrique de la vigne et mesure des variables climatiques

Les données fournies par la station météorologiques sont utilisées dans les calculs de différents variables climatiques. Celle-ci nous permettent de suivre les dynamiques de l'évolution de l'état hydrique de la plante.

#### a. Déficit de pression de vapeur

Les données récoltées par la station météorologique nous permettent de calculer le **déficit de pression de vapeur** (VPD). Pour calculer ce VPD nous devons avant tout obtenir des valeurs intermédiaires sous la forme du calcul de la **pression de vapeur saturante** (Esat) et la **pression de vapeur réelle** (Ea).

L'Esat correspond à la pression on considère un équilibre entre la phase gazeuse de l'eau et ça phase liquide. C'est le moment où l'atmosphère se trouve saturé en vapeur d'eau à une température donnée. Dans notre cas la température représente le principal point d'inflexion de cette Esat. Si la température augmente, Esat augmente et inversement en suivant une courbe exponentielle.

L'Ea correspond à la teneur en vapeur d'eau de notre air à un moment donnée. Tant que cette pression est inférieure à l'Esat alors des phénomènes d'évaporation peuvent avoir lieu. Lorsque l'Ea devient supérieur à l'Esat on assiste à des phénomènes de condensation. L'air ne peut plus physiquement se charger d'eau en phase gazeuse. Pour l'obtenir le calcul comporte les valeurs de température minimale et maximale de la journée ainsi que les valeurs d'humidité relative maximale et minimale de la journée.

La différence entre Esat et Ea nous donne le VPD. Concrètement, ce calcul nous permet d'obtenir, si Esat est supérieur à Ea, la teneur en eau nécessaire avant condensation. Dans le cas inverse cela nous donne le surplus d'eau dans l'atmosphère. Il semble important cependant de comprendre que ce calcul n'est valable que pour une température et une humidité relative données.

#### b. Evapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence correspond au calcul du volume maximale d'eau qu'une plante peut être susceptible de perdre par transpiration. Il intègre la capacité maximale de l'air à éliminer l'eau. Cela demande part du postulat que la plante est irriguée correctement en eau. Ce calcul (Figure ci contre) prend en compte la valeur de température moyenne et de vitesse du vent de notre station météo. Elle prend également en compte la valeur de rayonnement globale au travers du calcul du rayonnement net. La constante psychométrique,  $\gamma$ , représente une valeur dépendant de l'altitude. La pente de la courbe de pression de vapeur correspond aux variations des volumes d'eau dans l'air en fonction de la température.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_N - G) + \gamma \frac{900}{T + 273,15} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

*Figure 20 : Equation de l'évapotranspiration de référence avec  $R_n$  : le rayonnement net,  $G$  : les flux de chaleur du sol,  $T$  : la température moyenne,  $u_2$  : la vitesse du vent,  $e_s - e_a$  : le VPD,  $\Delta$  : la pente de la courbe de pression de vapeur saturante et  $\gamma$  : la constante psychométrique (Calanca & Smith, 2011).*

#### c. Déficit climatique

Le déficit climatique correspond à la différence entre les apports d'eau à la parcelle par les précipitations et l'évapotranspiration de référence calculée précédemment. Il permet de réaliser sur une année, sans prendre en compte les réserves en eau du sol, l'état de l'apport par rapport aux pertes de la plante. Cela nous indique si sur une année nous sommes bénéficiaires ou déficitaires en eau en fonction de la demande de la plante.

### 4. Interprétation des données du sol

#### a. Humidité du sol

Pour ce qui est de la mesure d'humidité, la valeur mesurée par le capteur doit être traité. En effet, il s'agit d'une mesure de tension effectué par la sonde dans le sol. Cette mesure doit ensuite être introduite dans une équation formulée par le fournisseur de la sonde (figure). Dans cette équation nous remplaçons la variable "RAW" par la mesure du capteur. Nous obtenons ensuite une valeur d'humidité (en %).

$$\Theta(m^3 / m^3) = 3.879 \times 10^{-4} \times RAW - 0.6956$$

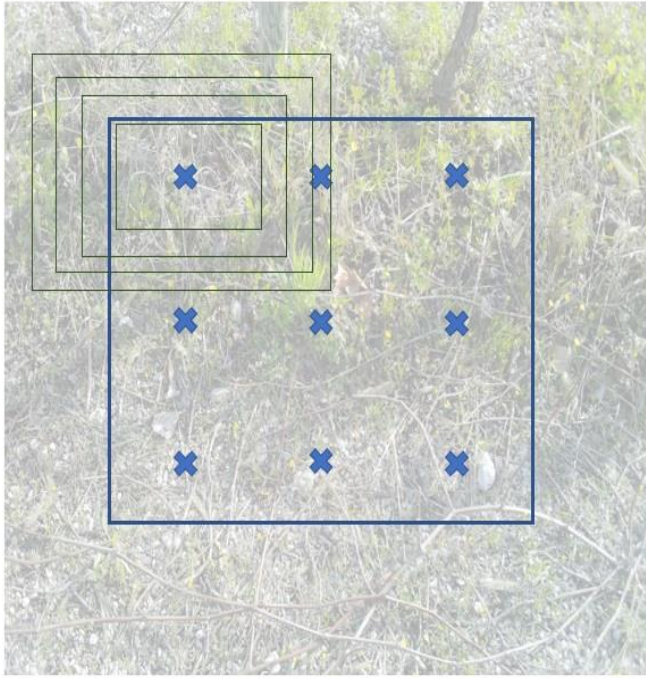
Figure 21 : Equation du calcul de l'humidité du sol (en %) à partir de la valeur mesurée par la sonde (METER©)

#### b. Biodiversité associée

Les photographies obtenues à l'aide des caméras Raspberry dirigés vers le sol dans l'inter-rang de vigne seront utilisées au sein de l'algorithme développé par PlantNet. Cet algorithme a été adapté pour réaliser une reconnaissance systématique de l'ensemble des espèces végétales présentes sur une photographie, en décomposant l'image en sous-image. Le principe de fonctionnement de cet **algorithme PlantNet** repose sur la reconnaissance de l'espèce principale présente au centre de la photographi, par le biais de l'application mobile ou en utilisant le site internet, via un modèle de deep learning. L'algorithme PlantNet renvoie un top-N des espèces reconnues, avec un score associé entre 0 et 1. Cependant, dans notre cas il faut reconnaître plusieurs espèces au sein d'un espace donné sur la photographie. Envoyé seulement une photographie du rang, lorsqu'il y a plusieurs espèces présentes, ne permet pas d'obtenir ce résultat.

La modification de l'algorithme PlantNet pour permettre une reconnaissance multiple d'espèces végétales sur une seule image est la suivante: Des pixels de la photographie, dont on aura déterminer la distance entre eux et entre les bords de la photographie, vont être choisi comme pixel d'ancrage. A partir de chacun de ces points d'ancrage des requêtes à l'application PlantNet vont être effectuées. Une requête correspond à une demande à PlantNet pour reconnaître l'espèces présentes. La première requête effectuée sur un pixel d'ancrage sera d'une largeur et d'une hauteur définit au préalable. Ensuite, les requêtes suivantes verront tour à tour ces dimensions augmentées. Un nombre de 20 requêtes seront réalisées. Deux issues à ces demandes sont possibles. La requête aboutit et une espèce est effectivement identifiée. La requête n'aboutit pas et il n'y a pas d'espèce identifiée. Ensuite l'espèce la plus identifiée parmi ces 20 requêtes est considérée comme étant présente au niveau du pixel d'ancrage. S'il n'y a pas suffisamment d'espèces reconnues, c'est-à-dire trop de requête non aboutit, alors l'algorithme ne ressort pas d'identification pour ce pixel d'ancrage. Cela permet de ne pas avoir de réponse lorsqu'il n'y a effectivement rien sur la photographie. L'algorithme continue le processus pour chacun des pixels d'ancrage permettant de couvrir le maximum d'espace au sein de la photographie. Le schéma suivant (figure) permet de visualiser le fonctionnement de cet algorithme. Le quadrilatère bleu représente la zone étudiée par l'algorithme au sein de laquelle nous retrouvons ces pixels d'ancrage. Les rectangles verts illustrent ces requêtes successives avec une augmentation du format entre chacune des requêtes. La sortie de l'algorithme nous donnera, ou pas, pour les 9 pixels d'ancrage du schéma le nom de l'espèce la plus souvent identifiée entre les requêtes.





**Légende :**

- Zone étudiée dans la photographie initiale
- Pixel d'ancrage
- Configuration d'une requête

Figure 22 : Schéma du fonctionnement de l'algorithme PlantNet sur une photographie du sol d'un inter-rang de vigne (A.Fribault)

# D-Chaine de traitement de l'information

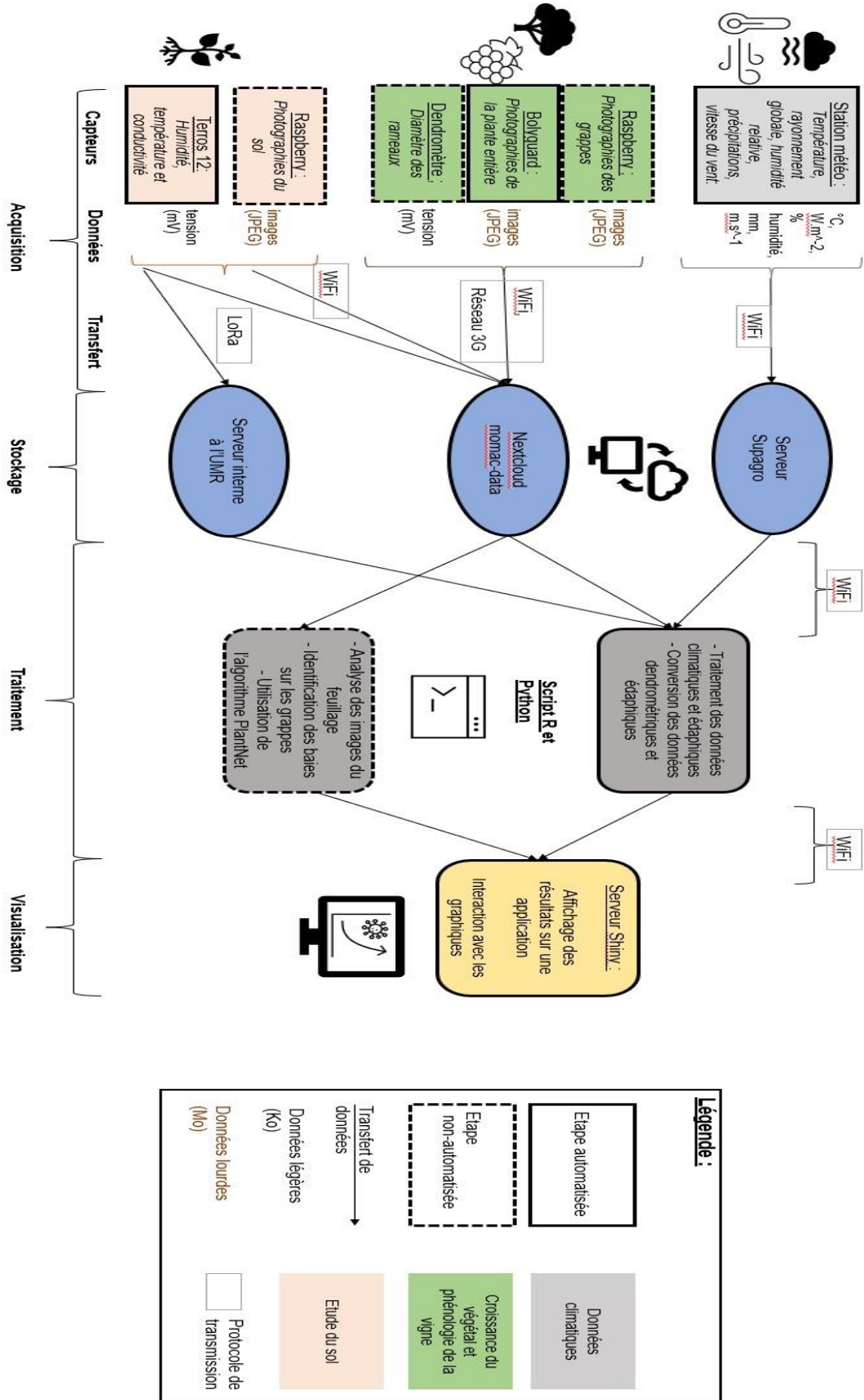


Figure 23 : Schéma de la chaîne de traitement de l'information. De l'acquisition des données par les capteurs à la visualisation numérique (A. Fribault)

### **III – RESULTATS**

Nous allons présenter les différents résultats obtenus et interprétés à l'aide de nos capteurs. Dans un premier temps nous allons présenter le développement phénologique et végétatif du plant de Cabernet Sauvignon observé en présentant le traitement d'image réalisé sur les baies. Toujours sur les données photographiques nous présenterons ensuite une série d'images de l'inter-rang de vigne et les résultats obtenus à l'aide de l'algorithme PlantNet. Cela laissera place au traitement des données de la station météo et de la sonde terros 12 afin d'essayer d'analyser l'état hydrique du sol. Ensuite nous mettrons en relation les données climatiques remarquable, chaleurs extrêmes et précipitations, aux évolutions du diamètre mesuré par les dendromètres situés sur les rameaux de notre plant de vigne. L'objectif de la présentation de ces différentes données sera la adéquation avec nos hypothèses présentées précédemment.

#### **A- Dynamiques phénologiques**

##### **1. Succession des stades du feuillage**

Une partie des photographies obtenues par la caméra Bolyguard sont présentées ci-dessous. Elles nous permettent d'observer les stades de développement du feuillage. En utilisant l'échelle BBCH on peut attester des dates des stades phénologiques. On repère les stades phénologiques de l'évolution du feuillage à partir de la sortie de la première feuille et de son étalement, ce stade est numéroté 11 dans l'échelle. Le stade 12 correspond à deux feuilles étalées et ainsi de suite jusqu'au stade 19, stade à partir duquel on ne compte plus les feuilles supplémentaires. Ce dernier stade a été atteint le 10-05 par notre plant de vigne. On peut observer une croissance du feuillage en hauteur jusqu'au 11-06.

Ces images permettent d'observer l'apparition des fleurs et des grappes mais ne donnent pas une résolution suffisante pour les analyser. Des comptages de pixel verts ont été réalisés afin de quantifier l'évolution du feuillage dans le temps sur les séries de photographies. Cela s'est avéré être un échec, pour le moment, puisque les éléments autour et le fond de l'image créent trop d'interférence lors du comptage. La volonté initiale était de sortir un indicateur du développement du feuillage à l'aide de ces pixels



Stade principal	Description
11	Première feuille étalée et écarté de la pousse
12	Deux feuilles étalées
13	Trois feuilles étalées
14	Quatre feuilles étalées
15	Cinq feuilles étalées
16	Six feuilles étalées
17	Sept feuilles étalées
18	Huit feuilles étalées
19	Neuf feuilles ou plus étalées

Figure 24 : Suivi du développement du feuillage avec les échelles BBCH ((Lorenz et al., 1995) ) correspondantes (A.Fribault)

## 2. Succession des stades de floraison et de développement des baies

### a. Floraison

L'utilisation du système Raspberry Pi et de ses objectifs permettent d'obtenir des images d'un organe spécifique avec une résolution intéressante. Ci-dessous on peut observer la succession des stades de développement phénologiques des inflorescences. La mise en place tardive de la solution Raspberry ne nous a pas permis d'obtenir les toutes premières images de la floraison.

Première photographie réalisée le 16-05, stade 53 la grappe est visible et droite. Toutefois la floraison n'a pas encore démarré les capuchons floraux sont encore présents. Le 18-05 on peut observer une apparition des premières fleurs sur la grappe. Dix jours après les premiers capuchons floraux tombent, c'est la séparation des fleurs. La floraison débute et la fécondation également. On estime la fin de la floraison au 31-05 pour cette grappe.

28-05, Echelle 60



16-05, Echelle 53



31-05, Echelle 69



18-05, Echelle 57

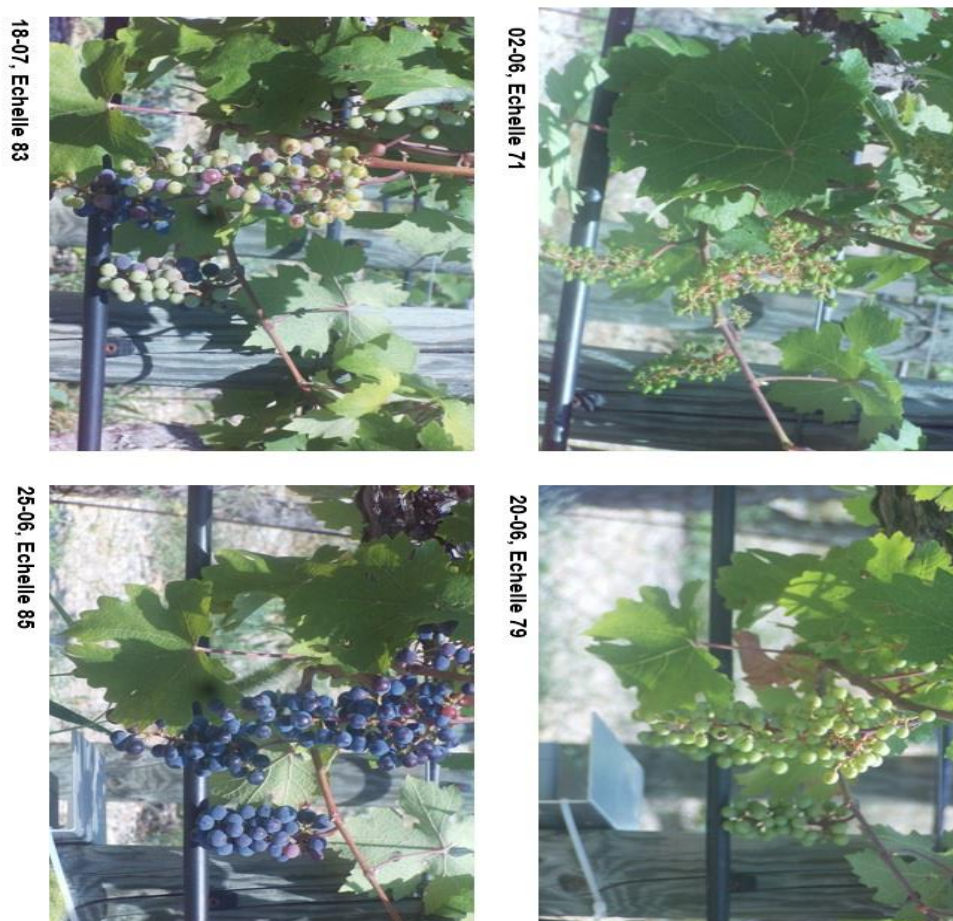


Stade principal	Description
53	Grappes visibles
55	Boutons floraux agglomérés
57	Grappes développées, fleurs séparées
60	Les premiers capuchons floraux se séparent du réceptacle
61	10% des capuchons sont tombés
62	20% des capuchons sont tombés
69	Fin de la floraison

Figure 25 : Suivi de la floraison de la vigne avec les échelles BBCH (Lorenz et al., 1995) correspondantes (A.Fribault)

## b. Développement des baies

La fin de la floraison laisse place au développement des baies. La nouaison correspond au moment où l’ovaire de la fleur, après la fécondation, va entamer son grossissement pour développer un fruit. Le 02-06 nous étions encore à ce stade. Entre cette date et le 26-06 on a pu observer une croissance des baies, de la taille d’un plomb de chasse jusqu’à leur forme finale, et une orientation des grappes vers le sol. Enfin, ces séries de photographies ont permis de mettre en avant la véraison, c’est-à-dire le changement de couleur des baies sur la grappe. Cette véraison initiée autour du 18-07 et se termine aux alentours du 25-07.



Stade principal	Description
71	Nouaison
73	Baies de la taille d'un plomb, inclinaison de la grappe vers le bas
77	Baies de la taille d'un petit pois. Grappes verticales
79	Fermeture de la grappe. Les fruits ne grossissent plus
81	Début de la maturation.
83	Changement de couleur en cours
85	Véraison les baies sont colorées et molles
89	Maturité des baies

Figure 26 : Suivi du développement des fruits de la vigne avec les échelles BBCH (Lorenz et al., 1995) correspondantes (A.Fribault)

### 3. Identification automatique des baies sur la grappe

#### c. Labellisation automatique des grappes

La première étape à réaliser avant de mesurer le volume des baies par l'algorithme mis en place par l'UMR AGAP consiste à identifier les baies sur les grappes. La figure suivante représente la sortie de l'intelligence artificielle entraînée par cette unité à la reconnaissance des baies. Cette image correspond à la labellisation d'une grappe entière. L'algorithme reconnaît les baies en les encadrant par une boîte rouge. Cet encadré est suivi d'un chiffre entre 0 et 1 qui correspond au pourcentage de fiabilité que l'intelligence artificielle attribue à sa reconnaissance. La plupart des baies ont un pourcentage de reconnaissance supérieur à 80% témoignant d'une bonne reconnaissance des baies par le programme. Cependant on peut noter des exceptions avec des baies non reconnues (encadré manuellement en bleu, par exemple) ou des baies reconnus avec un pourcentage d'exactitude jugé faible (45 à 60%).



Figure 27 : Photographie d'une grappe de Cabernet Sauvignon du 06-30 (A.Fribault) labellisé automatiquement (M.Caffier et C.Romieu).

Cette labellisation automatique des baies permet par la suite de pouvoir suivre certaines baies individuellement dans le temps. En annexe se trouve le suivi d'une seule baie, nommée baie numéro 100. Sur cette série on peut voir l'apparition de la véraison comme décrit dans les stades phénologiques précédemment. On observe une coloration de plus en plus importante de la baie dans les derniers jours de l'étude. L'étape suivante correspond à la réalisation d'une ellipse autour de la baie. Sur la série en annexe on peut observer cette ellipse, générée automatiquement par l'algorithme, sur toutes les baies. Cette ellipse sera ensuite utilisée dans le calcul du volume des baies.

#### d. Mesure de l'évolution du volume

La génération des ellipses permet à l'algorithme de réaliser une mesure du volume. Cette mesure est faite en voxel, une unité de volume pixelisée. Les résultats se montrent approximatifs, la courbe de croissance n'est pas vraiment linéaire, pour plusieurs raisons. Les conditions du milieu, luminosité, influent sur le bon déroulement de l'algorithme. Normalement la disposition de perles de couleurs de taille connues, des mires, permet de contourner cette problématique. De plus les photographies n'ont pas toujours eu le même angle de vue ce qui a également induit des biais, effaçable par l'utilisation de mires en situation normale. Toutefois on peut remarquer une augmentation du volume des baies sur toute la durée de l'étude.

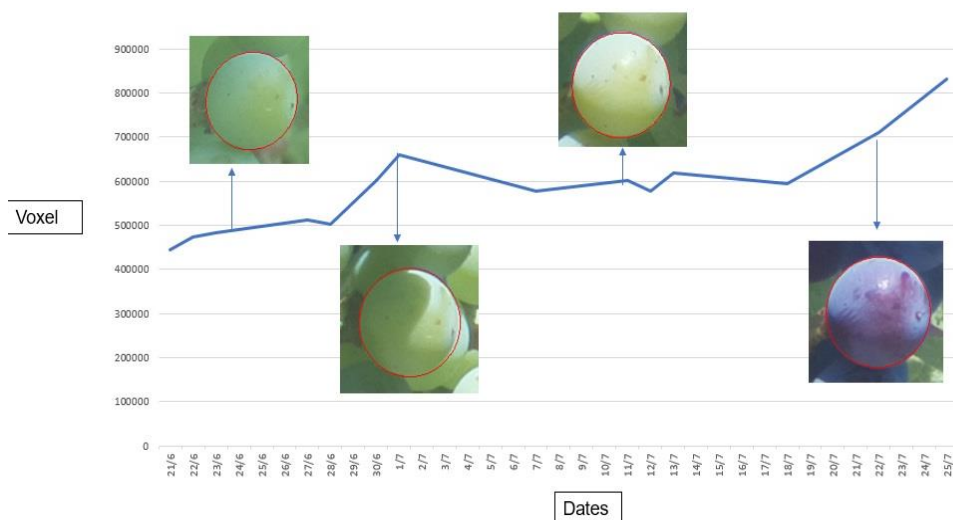


Figure 28 : Graphique de l'évolution de la taille des baies avec les photographies correspondantes à certains stades (M.Caffier, A.Fribault)

Le fait le plus important à prendre en compte pour cette étude des baies réside dans la réalisation de cet algorithme. La succession de photographies des grappes réalisée ne nous permet pas d'obtenir une valeur, ou tendance, fiable sur le volume des baies pour cette série. Néanmoins nous pouvons admettre que le matériel utilisé, le système de caméra Raspberry, permet d'obtenir des photographies ayant une résolution suffisamment importante autour des grappes pour pouvoir les traiter à l'aide de l'algorithme.

#### 4. Croissance du végétal

Nous avons obtenu à l'aide des dendromètres la variation de la taille du diamètre des branches du plant de vigne étudié. Cette variation a été reportée sur le graphique suivant. Les encadrés (rouges ou bleu) correspondent aux dates des événements climatiques que nous avons pu observer : les chaleurs extrêmes et les fortes précipitations.

Nous pouvons observer, au même moment sur les deux branches, quatre périodes intéressantes. La première correspond à une phase de croissance du diamètre du début de l'étude jusqu'à fin juin. La croissance continue malgré l'apparition de chaleurs extrêmes les 17 et 18 juin. La croissance correspond à un dépassement du diamètre initial de la journée durant la phase nocturne entraînant une augmentation de taille. Nous pouvons observer dans les derniers jours du mois de juin, à partir du 26 juin, une décroissance, il s'agit de la deuxième période identifiable. Le diamètre des rameaux diminuent jusqu'aux premiers jours de juillet.



Plus précisément, la perte de diamètre réalisée en journée par les différents mouvements d'eaux au sein de la plante n'est pas rattrapée pendant la nuit entraînant sur plusieurs jours une diminution notable du diamètre des rameaux. Ensuite durant tout le mois de juillet et le mois d'août on observe une période de stagnation. Les pertes de diamètre dans la journée sont compensées dans la nuit sans écart significatifs. Enfin, la dernière période correspond à une reprise légère de la croissance. Ces observations, similaires sur les deux rameaux, concordent avec les variations attendues et expliquées dans l'état de l'art (citer la publi).

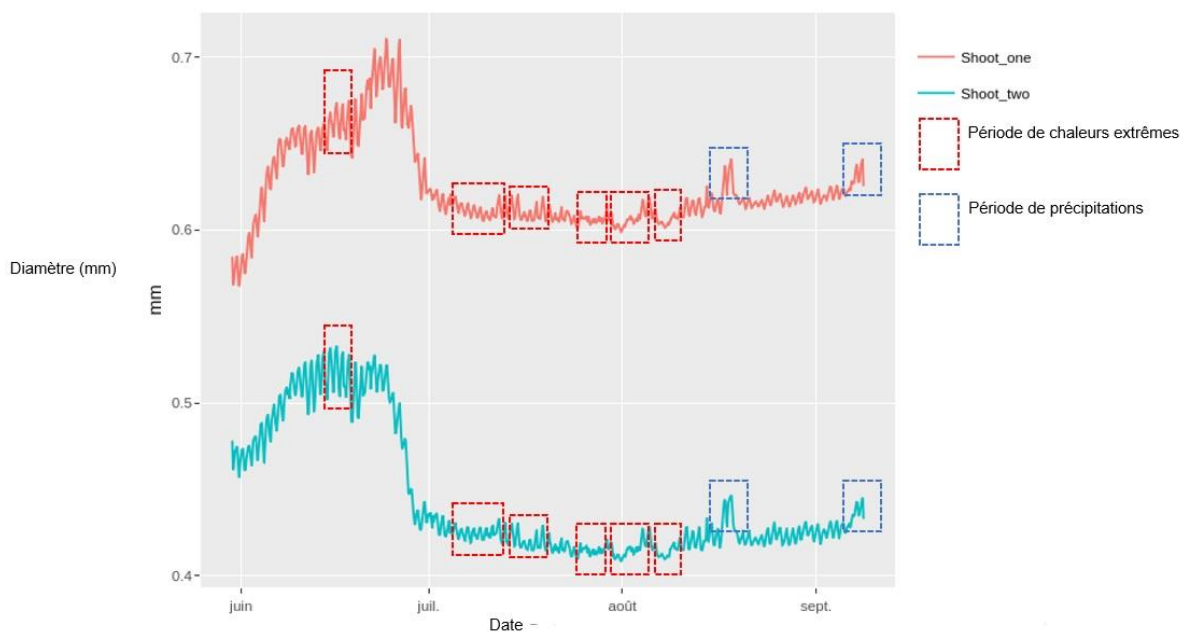


Figure 29 : Graphique de l'évolution du diamètre des deux rameaux de vigne mesurée par les dendromètres du 26-05 au 08-09. Identification des périodes de chaleurs extrêmes en rouges et de précipitations en bleues (A.Fribault)

## B-Algorithm PlantNet

Fin août à début septembre, du 29 août jusqu'au 5 septembre, nous avons réalisé une série de photographie de l'inter-rang de vigne. L'objectif consistait à essayer l'algorithme fourni par l'équipe de PlantNet permettant d'analyser la diversité floristique présente sur une photographie. Nous pouvons effectivement identifier différentes espèces au sein du quadra sur une série de plusieurs photographies. Les cercles présents dans le quadra représentent les pixels d'ancrages de l'algorithme. Leur taille correspond au nombre de fois que l'espèce a été reconnu lors des multiples requêtes. Enfin, la couleur permet de repérer l'espèce identifiée.

Certaines espèces apparaissent sur des photographies puis disparaissent sur les autres. C'est le cas du *Cynodon* (cercles jaunes en haut à gauche) qui n'apparaît que sur la première photographie (29-08). On peut également citer le *Polypogon* (cercles bleus au milieu) qui disparaissent sur la dernière photographie lorsque la plante sort du cadre. On peut également remarquer du mouvement dans la répartition des espèces notamment en observant *Portulaca* (cercles orange). La répartition de cette espèce semble prendre de l'ampleur jours après jours.

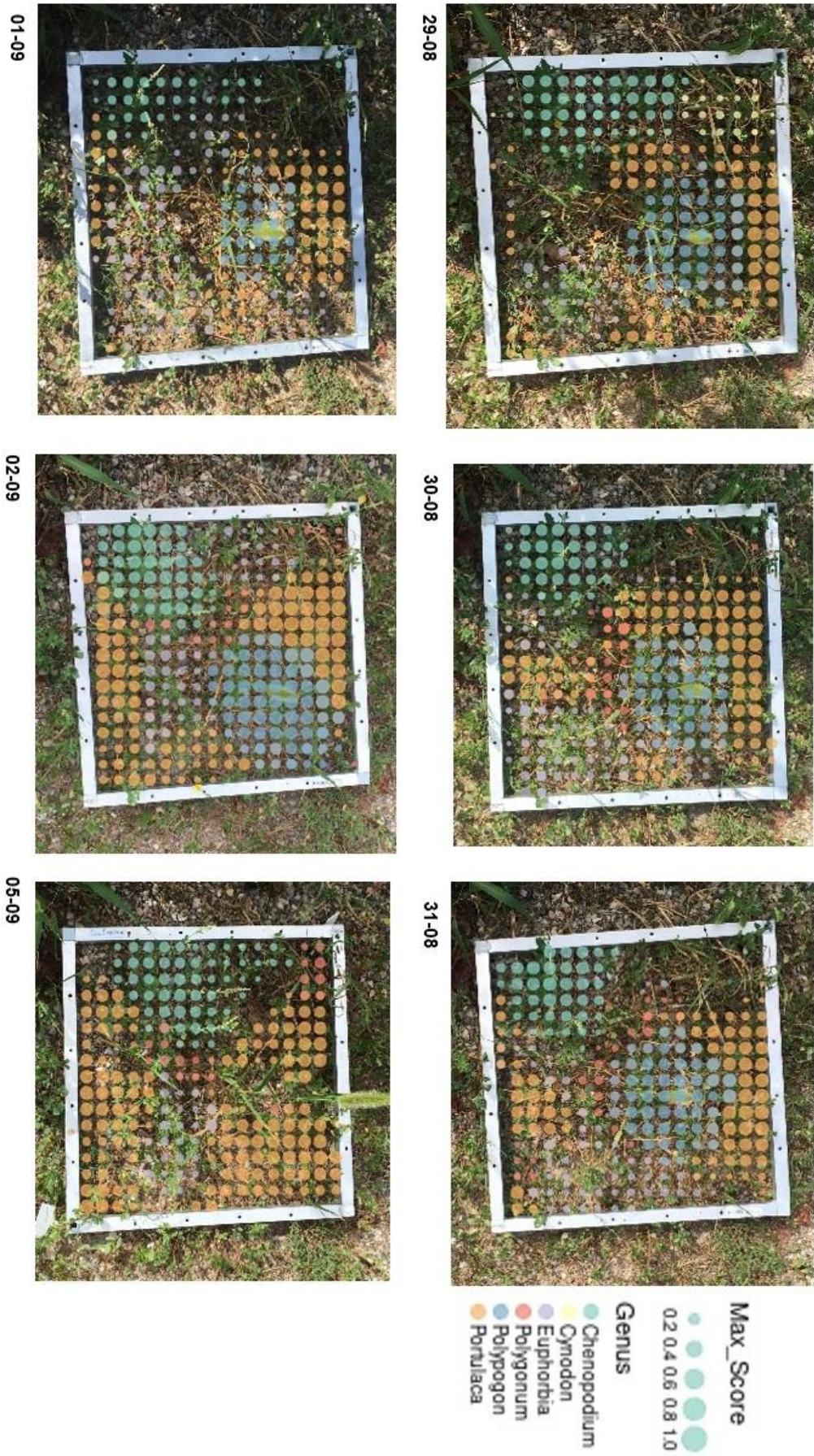


Figure 30 : Photographies de l'inter-rang de vigne et résultats de l'algorithme PlantNet (F.Vinatier)

## C-Bilan hydrique du sol et de la vigne

### 1. Evapotranspiration

A l'aide des données de la station météorologique présente sur le vignoble de La Gaillarde nous avons calculé l'évapotranspiration de référence. Pour cela l'équation et les calculs intermédiaires réalisés sont décrits précédemment. Le calcul du VPD représente une étape intermédiaire à l'ET<sub>0</sub>. On observe à première vue que l'évolution de l'évapotranspiration n'est pas linéaire. On peut néanmoins noter les événements climatiques remarquable comme certaines chaleurs extrêmes ou les précipitations. Cependant, le calcul de l'ET<sub>0</sub> ne dépendant pas uniquement de la température ou de l'humidité de l'air (également la vitesse du vent et le rayonnement net) il n'est pas simple d'identifier clairement la présence d'évènements climatiques à l'aide de ce graphique.

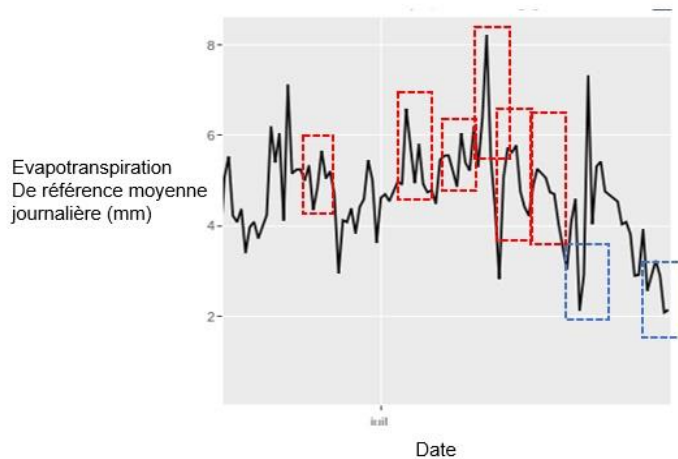


Figure 31 : Graphique de l'évolution de l'évapotranspiration de référence moyenne journalière entre le 25-05 et le 07-09. Les évènements de chaleurs extrêmes et de fortes précipitations sont encadrés respectivement en rouges et bleues (A.Fribault).

### 2. Déficit climatique

Le déficit climatique représente le cumul de la différence entre les précipitations et l'ET<sub>0</sub>. On peut très nettement voir la période de sécheresse. En effet, il n'y a eu que très peu de précipitations entre le 24-06 et le 15-08. Entre ces deux période le déficit climatique n'a fait que se creuser sans jamais pouvoir inverser la tendance. Nous avons entouré en bleus les périodes de fortes précipitations du 15-08 et du 07-09 pour indiquer l'effet de ces pluies sur le déficit climatiques. On constate logiquement une remontée du déficit climatique à l'aide de ces apports.

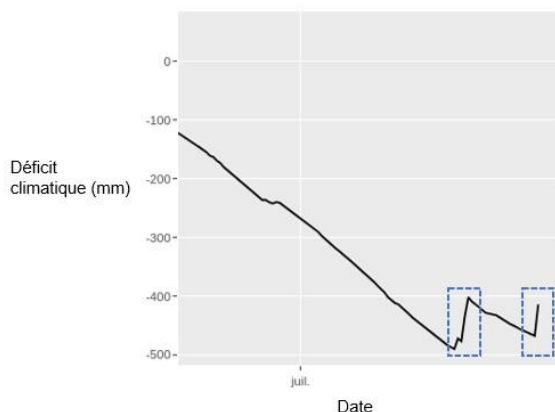


Figure 32 : Graphique de l'évolution du déficit climatique (précipitations - évapotranspiration de référence) sur la période du 25-05 au 07-09. Les fortes précipitations sont encadrées en bleues (A.Fribault)

### 3. Etat hydrique du sol

La sonde terros 12 renvoi une tension que nous analysons à l'aide de l'équation fournie par le constructeur. Cela permet de ressortir une mesure de l'humidité du sol à un pas de temps de 10min. Nous pouvons visualiser graphiquement l'évolution de cette humidité sur le graphique suivant. Il y a l'apparition d'augmentations journalières soudaines et répétées : l'irrigation. En effet, un système de fertirrigation (apport d'eau et de nutriments essentiels) permet de maintenir ce vignoble artificiel en vie. Ces apports d'eaux journaliers (sauf le samedi et le dimanche) reflètent le fait qu'il s'agit d'un sol artificiel particulièrement drainant. Il est possible de remarquer que l'humidité du sol ne reste pas stable au sein de celui-ci lorsqu'il y a un apport d'eau, Après chaque irrigation il y a une chute du pourcentage d'humidité du sol mesuré par la sonde. Nous avons encadré en bleus les périodes de fortes précipitations qui se démarque par une humidité du sol anormalement élevée. On peut voir, que l'eau ne se draine pas aussi facilement après ces pluies qu'après l'irrigation. En effet, l'humidité du sol met plus de temps à revenir à son niveau initial. Il y a un effet de saturation en eau du sol entraîné par ces forts volumes sur une courte période.

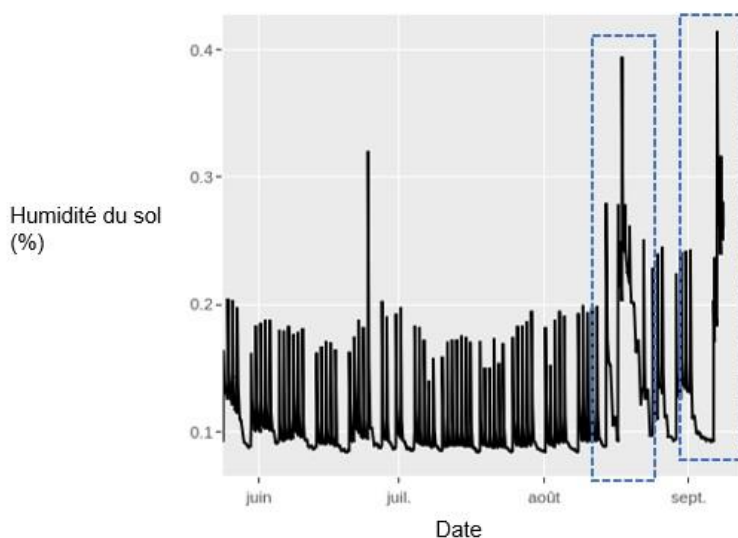


Figure 33 : Graphique de l'évolution de l'état de l'humidité du sol sur la période du 25-05 au 07-09. Les fortes précipitations sont encadrées en bleues (A.Fribault)

## D- Évènements climatiques observés et effets sur le matériel végétal

### 1. Vague de chaleur

Nous avons défini, à l'aide de l'état de l'art effectué préalablement, une chaleur extrême comme étant une journée avec une température maximale supérieure à 35°C. Le tableau suivant répertorie les chaleurs extrêmes observées sur la période de l'étude. Nous avons également défini une **vague de chaleur** comme une succession d'au moins 3 jours de chaleur extrême.

Tableau 4 : Tableau des jours de chaleurs extrêmes (température supérieure à 35°C), identification des périodes de vague de chaleurs (au moins 3 jours successifs de chaleurs extrêmes). (A.Fribault)

Date	T° Max
16-juin	36,09
17-juin	40,38
06-juil	35,5
07-juil	36,5
08-juil	36,37
09-juil	36,3
10-juil	36,97
15-juil	37,92
16-juil	38,51
17-juil	36,32
18-juil	35,36
25-juil	37,5
26-juil	35,76
30-juil	36,37
31-juil	37,32
01-août	37,18
02-août	37,23
05-août	35,33
06-août	37,09
07-août	35,08
08-août	35,7
09-août	35,89
23-août	36,03

Les effets de ces vagues de chaleur sur le végétal sont représentés par les graphiques suivants. Il s'agit des mesures de diamètre des rameaux de vigne réalisées par les dendromètres. L'encadré rouge correspond à la vague de chaleur. Pour l'exemple nous avons choisi la vague de chaleur du 05-08 au 09-08. Les effets sur le diamètre sont facilement identifiables. Lorsque nous ne sommes pas en période de vague de chaleur nous pouvons distinguer la phase diurne, décroissance, et la phase nocturne, croissance. Lorsque nous sommes en période de chaleur nous ne pouvons pas les distinguer l'une de l'autre. Ce constat vaut pour l'étude des deux branches. Il n'y a plus de décroissance journalière mais il n'y a plus non plus de croissance nocturne. Les variations des diamètres semblent bloquées. Lorsque les températures maximales diminuent le cycle reprend son cours normalement (observable avant et après l'encadré rouge).

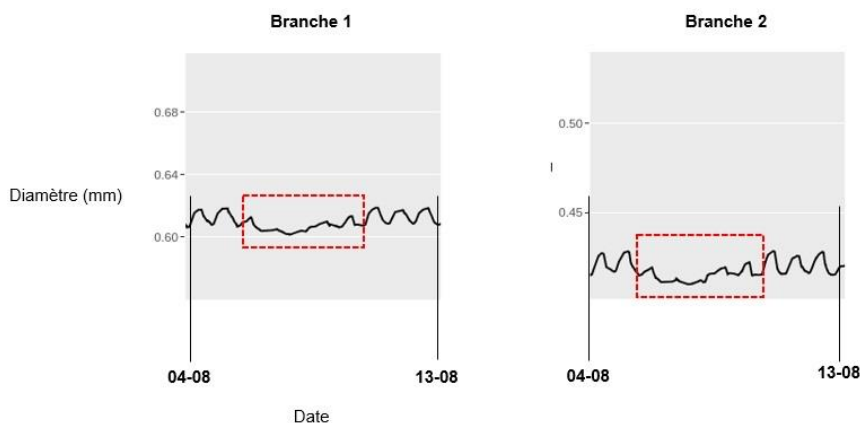


Figure 34 : Effet d'une période de vague de chaleur, encadré en pointillé rouge, sur le diamètre de deux rameaux de vigne (A. Fribault)

## 2. Fortes précipitations

Le graphique suivant représente les précipitations journalières sur la période du 25-05 au 23-08. On observe une période de sécheresse entre le 26-06 et le 15-08, c'est-à-dire absence ou très faible volume de précipitations. On peut également observer une période de fortes précipitations sur les 3 jours suivant le 15-08 avec un total de 100mm de pluie. On observe une autre période de fortes précipitations le 07-09.

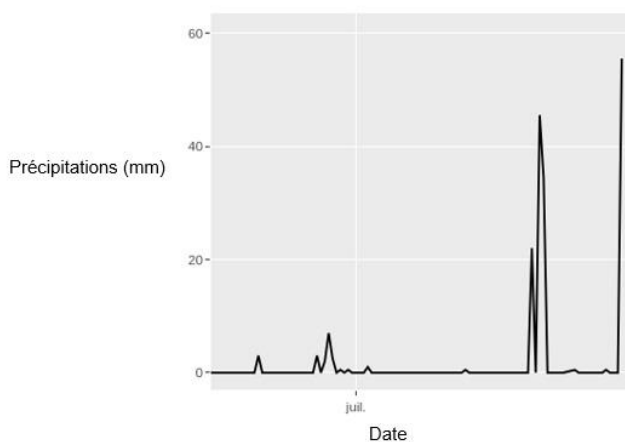


Figure 35 : Courbe des précipitations du 25-05 au 07-09 (A.Fribault)

À l'instar des périodes de chaleurs extrêmes, les périodes de précipitation transparaissent sur la croissance du végétal. Les graphiques suivants correspondent aux variations du diamètre des rameaux mesurés par les dendromètres sur la période du 14-08 au 21-08. Sur cette période il y a eu environ 100mm de pluies tombées entre le 15-08 et le 18-08. On observe une forte reprise de la croissance nocturne à l'arrivée des premières pluies. L'amplitude de croissance du diamètre des rameaux est plus importante.

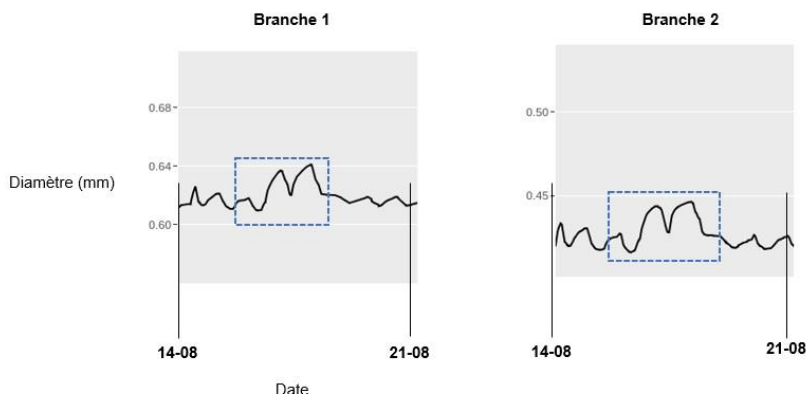


Figure 36 : Effet d'une forte précipitations, encadré en pointillé bleu, sur le diamètre des rameaux de vigne (A.Fribault).

## E- Communication des résultats

La communication des résultats représente le point d'orgue de ce projet. L'objectif, présenté dans la chaîne de traitement de l'information consiste à récupérer automatiquement les données des différents capteurs puis stocker ces informations sur des serveurs informatiques associés. Ensuite, les algorithmes de traitements doivent pouvoir récupérer la donnée sur ces serveurs afin de sortir des variables présentables. L'application Shiny présentée ci-dessous correspond à l'étape finale de cette chaîne de traitement.

Il s'agit d'une interface graphique interactive. Dans un premier temps il est possible d'interagir avec les graphiques en choisissant dans l'onglet situé à gauche de l'écran les valeurs à afficher. Ces valeurs correspondent aux données (brutes et élaborées) obtenues et calculées par les différents capteurs. Ces onglets font apparaître des menus déroulants permettant de choisir la donnée voulue. Le menu "terros 12" correspond à la sonde de température et d'humidité du sol, le menu "meteo" à la station météorologique et aux données d'évapotranspiration puis de déficit climatique calculées, le menu "dendrometer" correspond aux mesures du diamètre des branches et la sonde "mto" correspond à l'hygromètre et au pyranomètre installés à côté du plant de vigne. Il est également possible d'interagir directement sur les graphiques. La librairie "plotly" permet de réaliser des graphiques modulables en créant des fenêtres de zoom de taille souhaitée sur les graphiques. Cela permet de pouvoir regarder avec plus de précisions certaines périodes particulières. C'est de cette manière que les résultats présentés précédemment (notamment les mesures de dendromètres relatives à certaines périodes) ont été isolées. Enfin, cette interface Shiny permet également de présenter les photographies de vignes associées à la station d'observation.

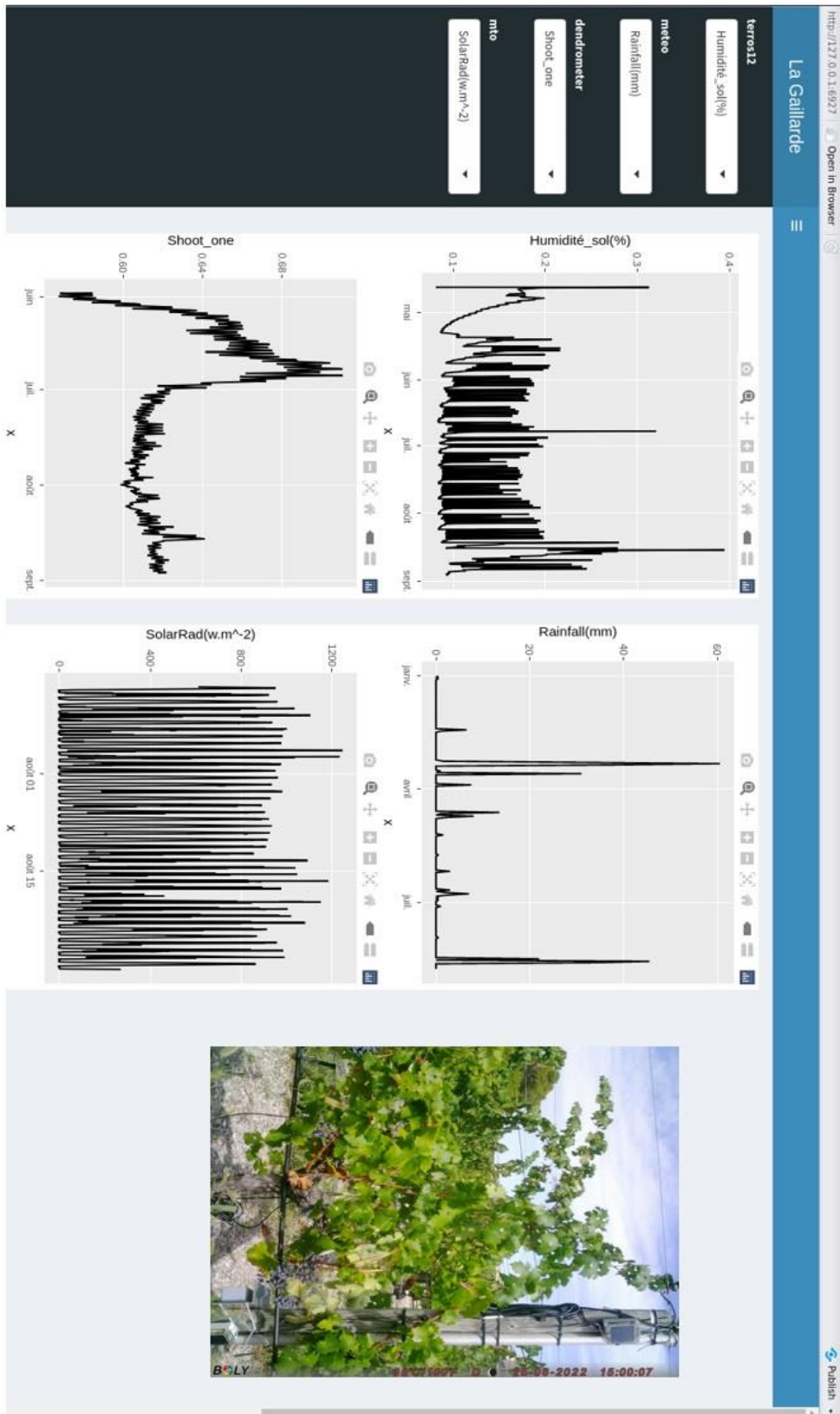


Figure 37 : Capture d'écran de l'application Shiny (A.Fribault)



## **F- Discussion des hypothèses**

### **1. Suivi du développement de la vigne et des baies**

L'installation des caméras nous a permis de suivre le développement de la vigne. A l'aide de l'utilisation de plusieurs systèmes de caméras nous avons pu attester de différents stades phénologiques : de la croissance du feuillage à la véraison des baies. Les images obtenues ont ensuite été traitées à l'aide d'un algorithme d'intelligence artificielle permettant dans un premier temps d'identifier les baies sur les grappes, ensuite de modéliser la forme du contour de la baie et enfin de calculer leurs volumes. Cette dernière réussite ouvre différentes possibilités quant à l'étude du stress hydrique et de son effet sur le remplissage des baies de raisin. Les caméras de l'observatoire permettent d'attester du développement des stades phénologiques ainsi que des volumes des baies.

### **2. Suivi de la diversité floristique associée**

Le suivi des espèces végétales de l'inter-rang a été compromis durant cette étude. Cette hypothèse reposait essentiellement sur deux points : l'algorithme fourni par les experts en la matière PlantNet et la réalisation de photographies ayant une résolution suffisamment importante.

Le premier point nous a posé des problèmes. L'algorithme présenté dans cette étude est une amélioration de l'algorithme initial. Au début nous ne pouvions pas prédéfinir une zone d'étude au sein d'une image pour effectuer les multiples requêtes aux différents pixels d'ancrages. Cette zone d'étude était par défaut, et non modifiable, l'image entière. Cela entraînait de nombreux problèmes notamment aux bords des images où la plupart des requêtes n'aboutissaient pas créant des points non reconnus. Nous avons donc effectué la demande d'un changement dans l'algorithme : la possibilité de pouvoir définir une zone à étudier au sein de la photographie initiale. Le temps que cette requête intègre le planning de travail des équipes PlantNet concernées a demandé quelques mois. Cette attente est compréhensible puisque la réalisation de cet algorithme ne représente qu'une de leurs nombreuses activités.

Le second point nous a également causé un retard important. Les premières photographies, réalisées et analysées (exemple en annexe), ne permettent pas une interprétation des espèces présentes. Nous avons alors décidé de travailler, en parallèle de la demande sur l'algorithme, sur la résolution des photographies. L'objectif était d'obtenir un maximum de pixel sur un espace plus restreint tout en ayant une photographie un peu plus large qu'un quadrat de 50cm par 50cm. L'intérêt était de pouvoir autoriser plus de pixel d'ancrage pour le même nombre de requêtes.

Ces deux problèmes nous ont retardé et nous n'avons pas réussi à suivre l'évolution de la diversité sur toute la saison. Néanmoins nous avons réussi à la toute fin de l'étude à analyser une série de photographies. On peut remarquer que l'algorithme fonctionne et peut donc être intégré au prototype d'observatoire. Les résultats en eux-mêmes ne sont pas probants quant à la succession des espèces mais nous avons une preuve de concept du fonctionnement de l'algorithme.

### **3. Corrélation avec les variables climatiques**

La capture du développement végétatif et phénologique de la vigne avait pour objectif d'être corrélée avec l'étude des variables climatiques. La mesure du volume des baies n'a pas

pu nous indiquer de résultats probants que l'on pourrait lier avec les différents événements hydro-climatiques survenues durant l'étude. Il en est de même pour les stades phénologiques. Toutefois, l'impact climatique a pu être observé à l'échelle de la plante à l'aide de l'observation des variations du diamètre. Les mesures des dendromètres nous indiquaient clairement la présence de fortes chaleurs ou de précipitations.

## IV – DISCUSSION

### 1. Points de vigilances

La contrainte initiale du projet MOMAC demandait des capteurs **autonomes** avec une **faible consommation** en énergie. Pour la plupart des capteurs météorologiques nous sommes parvenus à ce résultat à l'aide du système de transmission LoRa et du panneaux solaire permettant une autonomie certaine. Pour ce qui est des caméras le bilan se trouve être plus mitigé. En effet, nous avons réussi à faire la preuve du concept qu'elles nous permettaient d'observer les stades phénologiques. Cependant, les systèmes Raspberry Pi ne ce sont pas encore montrés probant. Ils ne permettent pas encore une autonomie et une faible consommation en énergie. Les photographies obtenues sont le résultat de prises de vues manuels, réalisé avec une certaine rigueur, afin d'avoir des images des grappes. Quant aux photographies du sol, elles ont été prises à l'aide d'un smartphone. Aucun système caméra essayé jusque-là ne permit d'obtenir des images utilisables par l'algorithmes PlantNet. Des travaux parallèles en cours sont plus avancés sur un système de caméra Raspberry Pi.

Une année ne suffit pas à étudier les **changements climatiques**. On l'a démontré lors de l'état de l'art, les évolutions de notre climat s'observent sur plusieurs décennies. Pour la mise en place et le déploiement de cet observatoire nous devons garder en mémoire que nous cherchons à capter des phénomènes qui s'observent sur la durée. Ainsi les résultats de ce rapport ne peuvent servir à prouver la pertinence des changements climatiques. Toutefois, cet observatoire permet d'attester des évènements climatiques et pourrait, après pusieurs années de mise en service, capter l'évolution du climat

Le **stockage des données** représente également un point important à soulever. Comme nous avons pu le montrer sur le schéma de la chaine de traitement de l'information (Matériel et Méthode) il existe différents serveurs de stockage des données brutes. L'idée serait d'avoir un lieu de stockage commun au projet MOMAC de toutes les données tout en gardant un stockage parallèle des données propre à chaque laboratoire. En effet, un espace de stockage commun aux membres du projet se montrerait confortable. Cependant le projet n'est pas éternel et à la fin de celui-ci il faudra trouver une ou plusieurs alternatives au stockage.

Il nous faut encore perfectionner le **traitement des informations** obtenues. Si nous sommes capables de traiter les grappes et les baies associés avec une certaine réussite, il nous faut encore travailler sur l'analyse du feuillage. En effet, les photographies de la plante entière ne subissent encore aucun traitement et ne renvoient aucune information calculée. Des travaux approfondis vont être menés pour pouvoir calculer le taux de vert du feuillage en question afin de l'utiliser ensuite comme un indicateur de croissance. Enfin les analyses de la diversité floristique du sol demande encore à être perfectionner. Si nous pouvons affirmer que l'algorithme fonctionne il reste encore à savoir comment en tirer des indicateurs de peuplement ou de recouvrement d'une surface.

Les données collectées par la station météorologique permettent le calcul d'un **déficit climatique** en calculant l'évapotranspiration de référence. Cependant, cette variable ne prend pas en compte l'irrigation. L'installation d'un débitmètre reste une éventualité afin d'ajouter, avec précision, les volumes d'eau apportées par l'irrigation dans le déficit. Ce dernier peut d'ailleurs se montrer imposant par les importants volumes déficitaires qu'il indique. Néanmoins il faut comprendre que le déficit climatique ne prends absolument pas en compte les réserves

hydriques disponibles dans le sol. Ces réserves sont normalement renouvelées de la fin de l'automne au début du printemps.

Il reste encore également à corréliser tous les indicateurs obtenus avec le climat. Nous avons remarqué des liens entre les données mesurées par les dendromètres et les événements climatiques survenus. Nous devons encore pouvoir observer des effets de ces événements sur les dates d'apparition des stades phénologiques, ce qui demande un jeu de données de plusieurs années. Un lien doit également être effectué avec le volume des baies mais requiert également plusieurs années de données.

## **2. Perspectives du projet**

L'application web Shiny n'en est encore qu'à son premier jet. De nombreuses autres fonctionnalités peuvent être ajoutées relatives notamment aux variables calculées. L'objectif serait à terme de pouvoir ajouter les données obtenues sur le calcul du volume des baies à l'aide des images des grappes et de leur traitement. Il est également envisagé de pouvoir visualiser en temps réel le développement et la succession de la diversité floristique en lien avec les résultats de l'algorithme PlantNet. Les applications web Shiny étant en constante évolution il est possible d'ajouter de nombreux autres items afin d'améliorer l'interaction avec les données. Enfin, l'idée serait d'ajouter une carte permettant de géolocaliser les futurs autres observatoires du projet et de pouvoir accéder à leurs valeurs en un clic.

Le développement de cet observatoire s'inscrit pleinement dans le premier WP du projet MOMAC. La fin de ce stage ne représente pas pour autant une finalité au prototype, bien au contraire. Dès son commencement cette étude avait pour vocation de s'inscrire dans la durée. En effet, l'observatoire développé va être déployé sur les autres parcelles du réseau d'études (figure). L'intérêt sera de mesurer les conséquences du changement climatique sur différents modes de culture. Deux modalités pourront être observées : les variations inter annuelles au sein d'une même parcelle expérimentales et les variations au sein d'une même année entre les différentes parcelles expérimentales.

## A network of sites

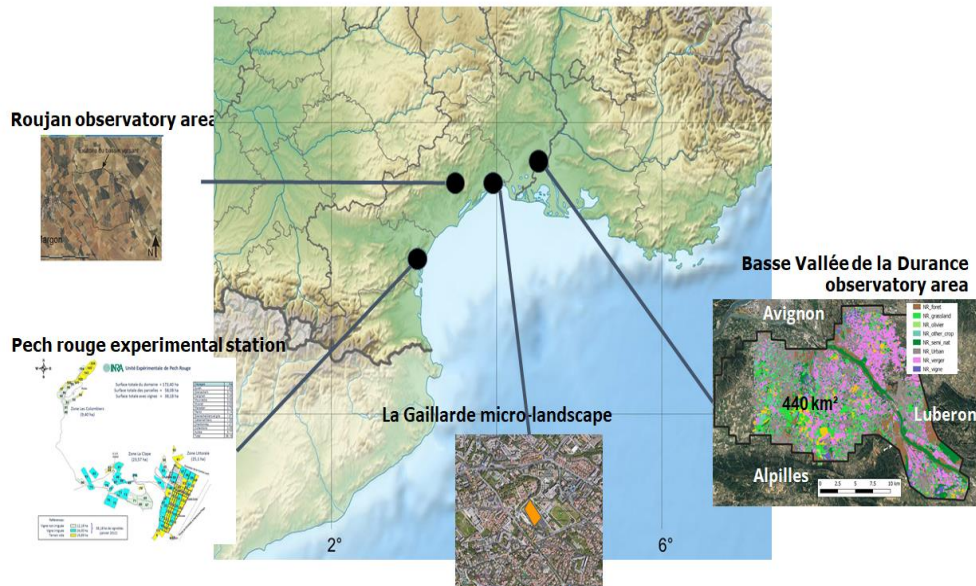


Figure 38 : Carte d'une partie de la France, comprenant les autres parcelles du réseau d'étude MOMAC (MOMAC)

Sur la station de Pech Rouge et plus précisément au sein de l'îlot des Colombiers plusieurs utilisations de l'observatoire ont déjà été réfléchis. Cet outil sera d'ores et déjà intégré à un plan d'expérimentation. L'objectif sera de comparer les modalités observées par l'observatoire sur différents itinéraires techniques : enherbement semé, enherbement spontanée et sans enherbement.

## CONCLUSION

Cette étude avait comme ambition de développer une plateforme d'étude des effets des changements climatiques sur la vigne et la diversité floristique du rang. Le développement de ce prototype prenait part au sein de l'un des axes de travail du projet MOMAC. La mission confiée consistait à réaliser la preuve du concept de cet observatoire. C'est-à-dire, de savoir si les outils mis à disposition permettaient d'obtenir des données cohérentes quant à l'étude des effets des changements climatiques. Ce prototype se basait sur l'utilisation d'une station météorologique, d'un capteur d'humidité du sol, d'une caméra capturant le feuillage, d'une caméra photographiant les fleurs puis les grappes de raisin et enfin d'un appareil photo permettant d'obtenir des photographies du sol. L'objectif, à l'aide des capteurs cités, consistait à démontrer la faisabilité d'un observatoire de suivi, de traitement et de communication des données de variables édaphiques, climatiques, phénologiques et végétales colocalisées à la vigne et à la diversité floristique de l'inter rang.

La preuve de concept de l'observatoire a pu être réalisée. En effet, nous avons pu trouver un intérêt à chacune des variables obtenues. Les variables climatiques et édaphiques nous ont permis d'attester des événements hydro-climatiques. Nous avons réalisé une cinématique du développement du feuillage à l'aide des photographies de ce dernier et nous avons pu attester des dates des stades phénologiques présents durant l'étude. Les photographies des grappes ont pu être traitées par l'algorithme, dans un premier temps afin de distinguer ces baies sur les grappes ensuite pour pouvoir calculer un volume à partir de l'identification de ces baies. Un premier suivi de l'évolution du volume a été réalisé sur une série de photo d'une baie. Le résultat en tant que tel ne se montre pas concluant mais prouve que nous pouvons réaliser ce genre d'étude grâce aux images capturées. Pour ce qui est de l'étude de la biodiversité floristique les résultats sont également mitigés. Les différents retards n'ont permis de réaliser qu'une courte série de photographies à analyser. De même, cela n'a également pas permis d'essayer différents systèmes d'acquisition d'images. Néanmoins les quelques images obtenues ont permis de montrer que l'algorithme fonctionnait et qu'il pourrait être intégré à l'observatoire. Enfin, les dendromètres installés ont renseigné sur un indicateur de la croissance végétal : le diamètre des rameaux. Cet indicateur dépend des conditions climatiques et il a été possible d'identifier des variations dans le diamètre possiblement corrélable aux événements climatiques.

Cette étude a néanmoins démontré que la réalisation et la tangibilité d'un tel outil d'observation était possible. Cet observatoire pourra être implémenté dans différents plans d'expérimentations inhérents au projet MOMAC. Ce prototype sert également de base au projet et pourra encore être étayé de nouveaux outils afin de répondre au mieux aux problématiques.

Enfin, d'un point de vue personnel ce stage a été un défi supplémentaire. Mes connaissances et mes compétences sur les thématiques de la viticulture ont été étayées par l'approche des systèmes d'intelligence artificielle. Prendre part au sein d'un projet de cette envergure permet également de se rendre compte des intérêts des différentes parties prenantes et oblige à adapter son discours lorsque nous interagissons avec l'un ou l'autre. Ce prototype correspond à l'aboutissement de la collaboration de différents UMR pour l'avancée d'un projet commun.

## BIBLIOGRAPHIE

Affouard, A., Goëau, H., Bonnet, P., Lombardo, J.-C., & Joly, A. (2017). PI@ntNet app in the era of deep learning. *ICLR: International Conference on Learning Representations*.

Alpert, P. (2002). The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical Research Letters*, 29(11), 1536. <https://doi.org/10.1029/2001GL013554>

Aslyng, H. C. (1974). EVAPOTRANSPIRATION AND PLANT PRODUCTION DIRECTLY RELATED TO GLOBAL RADIATION. *Hydrology Research*, 5(4), 247-256. <https://doi.org/10.2166/nh.1974.0017>

Barbeau, G. (2007). *Climat et vigne en moyenne vallée de la Loire, France*. 9.

Barbedo, A., & Garcia, J. (2016). A review on the main challenges in automatic plant disease identification based on visible range images. *Biosystems Engineering*, 144, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.017>

Barthélémy, D., Boujeman, N., Molino, J.-F., Joly, A., & Goëau, H. (2014). *Botanists of the twenty first century: Roles, challenges and opportunities: Based on the proceedings of UNESCO International conference*,.

Baudart, C. (2009). *Le réchauffement climatique a un certain nombre d'effets sur le fonctionnement de l'agriculture. En matière de désherbage, des travaux sont en cours pour évaluer les risques d'évolution des espèces adventices. Les caractéristiques biologiques de certaines espèces les prédisposent à devenir des problèmes majeurs*. 3.

Bazin, A. (1860). *Notice sur la formation et la marche des orages dans le département de la Côte-d'or*.

Bazireau, M. (2022). *La vigne résiste à la vague de chaleur, mais souffre du manque d'eau*. Vitisphere. <https://www.vitisphere.com//actualite-97224-la-vigne-resiste-a-la-vague-de-chaleur-mais-souffre-du-manque-deau.html>

Bediaf, H., Journaux, L., Cointault, F., & Sabre, R. (2013). Détermination de la texture de la feuille de vigne par imagerie. *Orasis, Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur*.

Boiffin, J., François, L., & Richard, G. (2020). *Réussir l'implantation des cultures. Enjeux agroécologiques, itinéraires techniques* (Editions Quae).

Bonnardot, V., & Quenol, H. (2020). *Viticulture en Bretagne: Challenge ou opportunité? Quelques indices bioclimatiques régionaux*. Colloque de l'association internationale de climatologie, Rennes.

Bourgeon, M.-A., Paoli, J.-N., Villette, S., Jones, G., & Gée, C. (2015). L'imagerie multispectrale embarquée pour caractériser la croissance et l'état sanitaire du feuillage de la

vigne. *Journées Internationales de Viticulture GiESCO, GIESCO, Groupe International d'Experts en Systèmes Vitivinicoles pour la Coopération*,.

Brant Foote, G. (1984). A study of hail growth utilizing observed storm conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(1), 84-101.

Brunetti, M., Maugeri, M., & Nanni, T. (2001). Changes in total precipitation, rainy days and extreme events in northeastern Italy. *International Journal of Climatology*, 21(7), 861-871. <https://doi.org/10.1002/joc.660>

Calanca, P., & Smith, P. (2011). *L'évapotranspiration de référence et son -application en agrométéorologie*. 8.

Carbonneau, A., Torregrosa, L., Deloire, A., Pellegrino, A., Pantin, F., Romieu, C., Ojeda, H., Jaillard, B., Metay, A., & Abbal, P. (2020). *Traité de la Vigne* (3ème).

Ceballos, A., Martínez-Fernández, J., & Luengo-Ugidos, M. Á. (2004). Analysis of rainfall trends and dry periods on a pluviometric gradient representative of Mediterranean climate in the Duero Basin, Spain. *Journal of Arid Environments*, 58(2), 215-233. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.07.002>

Chantelot, E., Celette, F., Wery, J., & de Donadille, D. (2004). *Concurrence pour les ressources hydriques et azotées entre vigne et enherbement en milieu méditerranéen*. 12.

Chauvel, B., Darmency, H., & Munier-Jolain, N. (2018). *Gestion durable de la flore adventice des cultures*. Editions Quae.

Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress : Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 103(4), 551-560. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>

Chouard, P. (1960). Vernalization and it's relations of dormancy. *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant Mol. Bio*, 11, 191-238.

Cubero, S., Diago, M. P., Blasco, J., Tardaguila, J., Prats-Montalbán, J. M., Ibáñez, J., Tello, J., & Aleixos, N. (2015). A new method for assessment of bunch compactness using automated image analysis : Bunch compactness assessment using image analysis. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21(1), 101-109. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12118>

Cuccia, C. (2013). *Impacts du changement climatique sur la phénologie du Pinot noir en Bourgogne*. Université de Bourgogne.

Debaeke, P., & Sebillotte, M. (1988). Modélisation de l'évolution à long terme de la flore adventice. I. Construction d'un modèle descriptif de l'évolution quantitative du stock de semences de l'horizon travaillé. *Agronomie*, 8(5), 393-403. <https://doi.org/10.1051/agro:19880504>

Deloire, A., Pellegrino, A., & Rogiers, S. (2020). Cenni sul potenziale idrico delle foglie della vite. *Vigna & vino*, 2.



Delpuech, X., Garin, P., & L'Helgoualch, E. (2012). *Etretien du sol sous le rang de vigne : Innovation et perspectives*. 8.

Dong, S., Wang, P., & Abbas, K. (2021). A survey on deep learning and its applications. *Computer Science Review*, 40, 100379. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100379>

Evans, R. G. (1999). *Frost Protection in Orchards and Vineyards*. 20.

Fiedler, A. K., Landis, D. A., & Wratten, S. D. (2008). Maximizing ecosystem services from conservation biological control : The role of habitat management. *Biological Control*, 45(2), 254-271. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2007.12.009>

Fulchin, E. (2014). Les couverts végétaux des alliés de la viticulture. *Vitinnov*, 2.

Gaba, S. (2012). *Application des concepts d'écologie pour la gestion des adventices*. 33.

Gaviglio, C. (2022). *Gestion des sols viticoles* (Edition France Agricole).

Gibelin, A.-L. (2015). Evolution du climat passé en France métropolitaine depuis les années 50. *Météo France*, 22.

Glantz, M. H., & Katz, R. W. (1977). When is a drought a drought? *Nature*, 267(5608), 192-193. <https://doi.org/10.1038/267192a0>

Gontier, L. (2015). Engrais vert en viticulture : Incidence du type de couvert végétal et de son mode de destruction sur l'alimentation azotée de la vigne. *Winetech*, 4, 35-40.

Guyot, L., & Massenot, M. (1950). Sur la persistance prolongée de semences dormantes ans le sol de la pelouse à *Brachypodium pinnatum* du nord de la France. *Compte-rendu Académie des Sciences*, 230, 1894-1896.

Hacking, C., Poona, N., & Poblete-Echeverria, C. (2020). Vineyard yield estimation using 2-D proximal sensing: A multitemporal approach. *OENO One*, 54(4), 793-812. <https://doi.org/10.20870/oenone.2020.54.4.3361>

Houghton, J. (2005). Global warming. *Reports on Progress in Physics*, 68(6), 1343-1403. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/6/R02>

Huglin, P., & Schneider, C. (1998). *Biologie et écologie de la vigne* (Lavoisier).

Inouye, D. W. (2000). The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change. *Ecology Letters*, 3(5), 457-463. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2000.00165.x>

Inouye, D. W. (2008). EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON PHENOLOGY, FROST DAMAGE, AND FLORAL ABUNDANCE OF MONTANE WILDFLOWERS. *Ecology*, 89(2), 353-362. <https://doi.org/10.1890/06-2128.1>

INRAE. (2020). *Plaquette de présentation de l'Institut Nationale de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement*.

INRAE. (2021). *Le vignoble pédagogique expérimental Pierre Galet*. <http://www.institut-agro-montpellier.fr/recherche/dispositifs-de-recherche-et-experimentaux/le-vignoble-pedagogique-experimental-pierre>

Intrigliolo, D. S., Castel, J. R., & Cárcel, S. (2008). EFFECTS OF CROP LEVEL AND IRRIGATION ON YIELD AND WINE QUALITY OF TEMPRANILLO GRAPEVINES IN A DRY YEAR. *Acta Horticulturae*, 792, 371-378. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.792.43>

Janiesch, C., Zschech, P., & Heinrich, K. (2021). Machine learning and deep learning. *Electronic Markets*, 31(3), 685-695. <https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2>

Köchy, M., & Tielbörger, K. (2007). Hydrothermal time model of germination : Parameters for 36 Mediterranean annual species based on a simplified approach. *Basic and Applied Ecology*, 8(2), 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2006.04.002>

Krasnow, M. N., Matthews, M. A., Smith, R. J., Benz, J., Weber, E., & Shackel, K. A. (2010). Distinctive symptoms differentiate four common types of berry shrivel disorder in grape. *California Agriculture*, 64(3), 155-159. <https://doi.org/10.3733/ca.v064n03p155>

Kratschmer, S., Pachinger, B., Schwantzer, M., Paredes, D., Guzmán, G., Gómez, J. A., Entrenas, J. A., Guernion, M., Burel, F., Nicolai, A., Fertil, A., Popescu, D., Macavei, L., Hoble, A., Bunea, C., Kriechbaum, M., Zaller, J. G., & Winter, S. (2019). Response of wild bee diversity, abundance, and functional traits to vineyard inter-row management intensity and landscape diversity across Europe. *Ecology and Evolution*, 9(7), 4103-4115. <https://doi.org/10.1002/ece3.5039>

Labreuche, J., Laurent, F., & Roger-Estrade, J. (2014). *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable*. Editions Quae.

Laget, F., Tondut, J.-L., Deloire, A., & Kelly, M. T. (2008). Climate trends in a specific Mediterranean viticultural area between 1950 and 2006. *OENO One*, 42(3), 113. <https://doi.org/10.20870/oenone.2008.42.3.817>

Lai, Y., Li, Q., Li, J., Zhou, Q., Zhang, X., & Wu, G. (2021). Evolution of Frequency and Intensity of Concurrent Heavy Precipitation and Storm Surge at the Global Scale : Implications for Compound Floods. *Frontiers in Earth Science*, 9, 660359. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.660359>

Lamacque, L., Charrier, G., Farnese, F. dos S., Lemaire, B., Améglio, T., & Herbette, S. (2020). Drought-Induced Mortality : Branch diameter Variation Reveals a Point of No Recovery in Lavender Species. *Plant Physiology*, 183, 1638-1649.

Lean, J. L. (2010). Cycles and trends in solar irradiance and climate. *WIREs Climate Change*, 1(1), 111-122. <https://doi.org/10.1002/wcc.18>

Leolini, L., Moriondo, M., Fila, G., Costafreda-Aumedes, S., Ferrise, R., & Bindi, M. (2018). Late spring frost impacts on future grapevine distribution in Europe. *Field Crops Research*, 222, 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.018>

Lewitt, R. M. (1992). Alternatives to voxels for image representation in iterative reconstruction algorithms. *Physics in Medicine and Biology*, 37(3), 705-716. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/37/3/015>

Lindow, S., & Webb, R. (1983). Quantification of foliar disease plant symptoms by microcomputer-digitized video image analysis. *Phytopatology Journal*, 520-524.

Loreau, M. (2005). *Discours de cloture, dans : Actes de la Conférences internationale Biodiversité Science et Gouvernance*. [Discours de cloture].

Lorenz, D. H., Eichhorn, K. W., Bleiholder, H., Klose, R., Meier, U., & Weber, E. (1995). Growth Stages of the Grapevine : Phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*)—Codes and descriptions according to the extended BBCH scale. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 1(2), 100-103. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.1995.tb00085.x>

Lou, Y., Miao, Y., Wang, Z., Wang, L., Li, J., Zhang, C., Xu, W., Inoue, M., & Wang, S. (2016). Establishment of the soil water potential threshold to trigger irrigation of Kyoho grapevines based on berry expansion, photosynthetic rate and photosynthetic product allocation : Establishment of soil water threshold. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22(2), 316-323. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12208>

Luber, G., & McGeekin, M. (2008). Climate Change and Extreme Heat Events. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(5), 429-435. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.021>

Marjou, M. (2019). *Analyse climatique passée et future des terres viticoles sur le secteur Ventoux* (p. 97).

McCree, K. J. (1973). The measurement of photosynthetically active radiation. *Solar Energy*, 15(1), 83-87. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(73\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(73)90010-8)

McGregor, S. E. (1976). *Insect pollination of cultivated plants* (Vol. 496). Center for Environmental Policy and Behavior.

Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, 305(5686), 994-997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>

Menzel, A., & Fabian, P. (1999). Growing season extended in Europe. *Nature*, 397(6721), 659-659. <https://doi.org/10.1038/17709>

Molitor, D., Caffarra, A., Sinigoj, P., Pertot, I., Hoffmann, L., & Junk, J. (2014). Late frost damage risk for viticulture under future climate conditions : A case study for the Luxembourgish winegrowing region: Late frost damage risk. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20(1), 160-168. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12059>

Moreau, D., Busset, H., Matejcek, A., & Colbach, N. (2019). *Coupler l'utilisation d'un modèle de simulation et d'une plateforme de phénotypage à haut débit pour caractériser la réponse des adventices à une limitation en eau*. Séminaire CoSAC, INRA, Paris.

Morel, R. (2003). Les graminées indicatrices des conditions agroclimatiques. *Association internationale de Climatologie*, 15, 8.

Mosedale, J. R., Wilson, R. J., & Maclean, I. M. D. (2015). Climate Change and Crop Exposure to Adverse Weather : Changes to Frost Risk and Grapevine Flowering Conditions. *PLOS ONE*, 10(10), e0141218. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141218>

Ni, X., Li, C., Jiang, H., & Takeda, F. (2020). Deep learning image segmentation and extraction of blueberry fruit traits associated with harvestability and yield. *Horticulture Research*, 7(1), 110. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0323-3>

Nouaceur, Z., Laignel, B., & Turki, I. (2013). Changements climatiques au Maghreb : Vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ? *Physio-Géo*, Volume 7, 307-323. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3686>

Olivon, M., Fauriat, A., & Grelaud, C. (2014). *Enherbement intégral, semé, dans les coteaux des Côtes du Rhône septentrionales. Une solution vers le zéro herbicide ?* 6.

Pagliai, A., Ammoniaci, M., Sarri, D., Lisci, R., Perria, R., Vieri, M., D'Arcangelo, M. E. M., Storchi, P., & Kartsiotis, S.-P. (2022). Comparison of Aerial and Ground 3D Point Clouds for Canopy Size Assessment in Precision Viticulture. *Remote Sensing*, 14(5), 1145. <https://doi.org/10.3390/rs14051145>

Parker, A. K., García de Cortázar-Atauri, I., Gény, L., Spring, J.-L., Destrac, A., Schultz, H., Molitor, D., Lacombe, T., Graça, A., Monamy, C., Stoll, M., Storchi, P., Trought, M. C. T., Hofmann, R. W., & van Leeuwen, C. (2020). Temperature-based grapevine sugar ripeness modelling for a wide range of *Vitis vinifera* L. cultivars. *Agricultural and Forest Meteorology*, 285-286, 107902. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107902>

Patakas, A., Noitsakis, B., & Chouzouri, A. (2005). Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 106(2-3), 253-259. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.10.013>

Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Gibson, P. B. (2017). Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature. *Scientific Reports*, 7(1), 12256. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12520-2>

Pörtner, H.-O., & Roberts, D. C. (2022). *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*. 3068.

Pouget, R. (1988). Le débourrement des bourgeons de la vigne : Méthode de prévision et principes d'établissement d'une échelle de précocité de débourrement. *OENO One*, 22(2), 105. <https://doi.org/10.20870/oenone.1988.22.2.1260>

Pousset, J. (2017). *Engrais verts et fertilité des sols* (Edition France Agricole).

Prodhomme, C., Materia, S., Ardilouze, C., White, R. H., Batté, L., Guemas, V., Fragkoulidis, G., & García-Serrano, J. (2022). Seasonal prediction of European summer heatwaves. *Climate Dynamics*, 58(7-8), 2149-2166. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05828-3>

Quenol, H., Le Roux, R., & Tissot, C. (2019). *Adaptation de la viticulture au changement climatique : Vers des scénarios à haute résolution*. Colloque internationale de l'AIC, Thessaloniki, Grèce.

Quenol, H., & Roux, R. (2021). *Les impacts spatiaux du changement climatique sur la viticulture dans le monde* (ISTE).

Ramos, M. C. (2001). Rainfall distribution patterns and their change over time in a Mediterranean area. *Theoretical and Applied Climatology*, 69(3-4), 163-170. <https://doi.org/10.1007/s007040170022>

Raunkiaer, C. (1934). *The Life Forms of Plants and Statistical Plant Geography; being the collected papers of C. Raunkiaer*. Oxford Clarendon Press (UK).

Raymond, F., Ullmann, A., & Camberlin, P. (2016). Précipitations intenses sur le Bassin Méditerranéen : Quelles tendances entre 1950 et 2013 ? *Cybergeo*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27410>

Risi, C., & Roux, F. (2020). Comment se forme la grêle ? Une activité avec de la pâte à modeler. *La Météorologie*, 110, 012. <https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2020-0071>

Rusk, N. (2016). Deep learning. *Nature Methods*, 13(1), 35-35. <https://doi.org/10.1038/nmeth.3707>

Santesteban, L. G. (2019). Precision viticulture and advanced analytics. A short review. *Food Chemistry*, 279, 58-62. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.140>

Schaller, K., Berthold, G., & Löhnertz, O. (1991). *Investigations on the nitrogen turnover in permanent grass cover vineyard as a tool for better fertilization practices*. 173-180.

Schwarz, V., & Soubeyroux, J.-M. (2022). Quel climat en France en 2050 et 2100 ? *Annales des Mines*, 6.

Sgubin, G. (2018). The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 17.

Simonneau, T., Ollat, N., Pellegrino, A., & Lebon, E. (2014). *Contrôle de l'état hydrique dans la plante et réponses physiologiques de la vigne à la contrainte hydrique*. 21.

Spano, D., Cesaraccio, C., Duce, P., & Snyder, R. L. (1999). Phenological stages of natural species and their use as climate indicators. *International Journal of Biometeorology*, 42(3), 124-133. <https://doi.org/10.1007/s004840050095>

Thiery, D., & Chucho, J. (2007). *REFLEXION SUR LE DEVENIR D'INSECTES DU VIGNOBLE DANS LE CONTEXTE D'UN RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE GLOBAL*. 11.

Tomasi, D., Jones, G. V., Giust, M., Lovat, L., & Gaiotti, F. (2011). Grapevine Phenology and Climate Change : Relationships and Trends in the Veneto Region of Italy for 1964–2009. *American Journal of Enology and Viticulture*, 62(3), 329-339. <https://doi.org/10.5344/ajev.2011.10108>

Tzortzakis, N., Chrysargyris, A., & Aziz, A. (2020). Adaptive Response of a Native Mediterranean Grapevine Cultivar Upon Short-Term Exposure to Drought and Heat Stress in the Context of Climate Change. *Agronomy*, 10(2), 249. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020249>

Van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., & Gaudillère, J.-P. (2009). Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *OENO One*, 43(3), 121. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.3.798>

Van Leeuwen, C., Tregcoat, O., Choné, X., Jaeck, M.-E., Rabusseau, S., & Gaudillère, J.-P. (2003). Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. *Bulletin de l'OIV*, 76, 867-868.

Van Leeuwen, Destrac-Irvine, Dubernet, Duchêne, Gowdy, Marguerit, Pieri, Parker, de Rességuier, & Ollat. (2019). An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations. *Agronomy*, 9(9), 514. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090514>

Varlet-Grancher, C., Gosse, G., Chartier, M., Sinoquet, H., Bonhomme, R., & Allirand, J. M. (1989). Mise au point : Rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 9(5), 419-439. <https://doi.org/10.1051/agro:19890501>

Venios, X., Korkas, E., Nisiotou, A., & Banilas, G. (2020). Grapevine Responses to Heat Stress and Global Warming. *Plants*, 9(12), 1754. <https://doi.org/10.3390/plants9121754>

Vennetier, M., & Ripert, C. (2010). Flore méditerranéenne et changement climatique : La course-poursuite est engagée -. *Forêt Méditerranéenne*, 11.

Wang, J., Zhang, Z., Luo, L., Zhu, W., Chen, J., & Wang, W. (2021). SwinGD : A Robust Grape Bunch Detection Model Based on Swin Transformer in Complex Vineyard Environment. *Horticulturae*, 7(11), 492. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7110492>

Wermelinger, B., Candolfi, M. P., & Baumgärtner, J. (1992). A model of the European red mite (Acari, Tetranychidae) population dynamics and its linkage to grapevine growth and development. *Journal of Applied Entomology*, 114(1-5), 155-166. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1992.tb01110.x>

Wild, M. (2009). Global dimming and brightening : A review. *Journal of Geophysical Research*, 114, D00D16. <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>

Willey, R. W. (1990). Resource use in intercropping system. *Agricultural Water Management*, 17, 215-231.

Wilson, E. O., & Peter, F. M. (1988). *Biodiversity* (The National Academy Press).

Wilson, H., Wong, J. S., Thorp, R. W., Miles, A. F., Daane, K. M., & Altieri, M. A. (2018). Summer Flowering Cover Crops Support Wild Bees in Vineyards. *Environmental Entomology*, 47(1), 63-69. <https://doi.org/10.1093/ee/nvx197>

Winter, S., Bauer, T., Strauss, P., Kratschmer, S., Paredes, D., Popescu, D., Landa, B., Guzmán, G., Gómez, J. A., Guernion, M., Zaller, J. G., & Batáry, P. (2018). Effects of vegetation management intensity on biodiversity and ecosystem services in vineyards: A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 55(5), 2484-2495. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13124>

Wyard, C., Fettweis, X., Belleflamme, A., Doutreloup, S., & Erpicum, M. (2017). *Reconstruction de l'évolution du rayonnement solaire reçu en surface en Europe occidentale sur la période 1900—2014 à l'aide du modèle atmosphérique régional MAR*. Colloque de l'Association Internationale de Climatologie : Climat, ville et environnement, Sfax, Tunisie.

Xyrafis, E. G., Fraga, H., Nakas, C. T., & Koundouras, S. (2022). A study on the effects of climate change on viticulture on Santorini Island. *OENO One*, 56(1), 259-273. <https://doi.org/10.20870/oenone.2022.56.1.4843>

Zabawa, L., Kicherer, A., Klingbeil, L., Milioto, A., Töpfer, R., Kuhlmann, H., & Roscher, R. (2019). *Detection of Single Grapevine Berries in Images Using Fully Convolutional Neural Networks* (arXiv:1905.00458). arXiv. <http://arxiv.org/abs/1905.00458>

Zabawa, L., Kicherer, A., Klingbeil, L., Töpfer, R., Kuhlmann, H., & Roscher, R. (2020). Counting of Grapevine Berries in Images via Semantic Segmentation using Convolutional Neural Networks. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 73-83. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.002>

Zhao, L., Fang, Q., Hou, R., & Wu, F. (2021). Effect of rainfall intensity and duration on soil erosion on slopes with different microrelief patterns. *Geoderma*, 396, 115085. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115085>

Zufferey, V., Cochard, H., Ameglio, T., Spring, J.-L., & Viret, O. (2011). Diurnal cycles of embolism formation and repair in petioles of grapevine (*Vitis vinifera* cv. Chasselas). *Journal of Experimental Botany*, 62(11), 3885-3894. <https://doi.org/10.1093/jxb/err081>

Zwaenepoel, P., & Bars, J. M. L. (1997). L'agriculture de précision. *Ingénieries eau-agriculture-territoires, Lavoisier ; IRSTEA ; CEMAGREF*, 67-79.

## **TABLE DES FIGURES**

Figure 1 : Schéma des hypothèses du projet MOMAC (MOMAC.,2021).....	5
Figure 2 : Représentation schématique des liens entre les différents WPs du projet MOMAC (issue de la description du projet MOMAC., 2021) .....	7



Figure 3 : Evolution de la température moyenne durant la période de croissance de la vigne (A) et nombre de jour avec des températures supérieure à 30°C par an (B) à Bordeaux entre 1951 et 2018 (Van Leeuwen et al., 2019) .....	8
Figure 4 : Schéma du pourcentage annuel du nombre de journée avec une température maximale supérieur à 35°C en France sur l’horizon 1976-2005 (A) et sur l’horizon 2071-2100 selon le scénario RCP8.5 du GIEC (B) (Schwarz & Soubeyroux, 2022). .....	9
Figure 5 : Carte des variations de précipitations en France entre 1960 et 2010 (Gibelin, 2015) .....	10
Figure 6 : Graphique de l'évolution de l'écart à la moyenne de la part des jours d'orage par an de 1972 à 2012 sur six stations de la côte méditerranéenne algérienne (Nouaceur et al., 2013) .....	11
Figure 7 : Schéma représentant le cycle phénologique de la vigne (Cuccia, 2013).....	14
Figure 8 : Graphique de l'évolution des date d'apparition de divers stades phénologiques de 1985 à 2016 (Marjou, 2019). .....	15
Figure 9 : Schéma de l'évolution des profils de charges hydriques dans le sol d'un rang enherbé (INT) et d'un rang nu (CWC) (Chantelot et al., 2004).....	21
Figure 10 : Photographies de grappes de raisin reconnus en conditions réelles par un algorithme d'intelligence artificielle (Wang et al., 2021) .....	24
Figure 11 : Graphique des variations du diamètre de branches de pommiers. En rouge un pommier subissant un stress hydrique et en bleu un pommier sans stress hydrique (Pallas et al., 2018) .....	25
Figure 12 : Grapique de l'évolution du diamètre d'une branche de fin avri à fin aout (Lamacque et al., 2020).....	26
Figure 13 : Plan du vignoble expérimental et identification des différentes zones (A. Fribault) .....	30
Figure 14 : Photographie des caméras Bolyguard (A.Fribault).....	31
Figure 15 : Photographie du système de caméra Raspberry (A.Fribault) .....	32
Figure 16 : Photographie du boitier d'alimentation et de transmission de la sonde Terros 12 (A. Fribault).....	33
Figure 17 : : Photographie de l'un des deux dendromètres du pied de vigne étudié (A. Fribault).....	34
Figure 18 : Photographie de l'hygromètre et du pyranomètre sur le vignoble (A.Fribault) .....	35
Figure 19 : : Photographie de la station météo (A.Fribault) .....	36
Figure 20 : Equation de l'évapotranspiration de référence avec $R_n$ : le rayonnement net, $G$ : les flux de chaleur du sol, $T$ : la température moyenne, $u_2$ : la vitesse du vent, $e_s - e_a$ : le VPD, $\Delta$ : la pente de la courbe de pression de vapeur saturante et $\gamma$ : la constante psychométrique (Calanca & Smith, 2011).....	39
Figure 21 : Equation du calcul de l'humidité du sol (en %) à partir de la valeur mesurée par la sonde (METER©) .....	40
Figure 22 : Schéma du fonctionnement de l'algorithme PlantNet sur une photographie du sol d'un inter-rang de vigne (A.Fribault) .....	41
Figure 23 : Schéma de la chaine de traitement de l'information. De l'acquisition des données par les capteurs à la visualisation numérique (A. Fribault) .....	42
Figure 24 : Suivi du développement du feuillage avec les échelles BBCH ((Lorenz et al., 1995) ) correspondantes (A.Fribault) .....	44
Figure 25 : Suivi de la floraison de la vigne avec les échelles BBCH (Lorenz et al., 1995) correspondantes (A.Fribault) .....	45

Figure 26 : Suivi du développement des fruits de la vigne avec les échelles BBCH (Lorenz et al., 1995) correspondantes (A.Fribault).....	46
Figure 27 : Photographie d'une grappe de Cabernet Sauvignon du 06-30 (A.Fribault) labellisé automatiquement (M.Caffier et C.Romieu).....	47
Figure 28 : Graphique de l'évolution de la taille des baies avec les photographies correspondantes à certains stades .....	48
Figure 29 : Graphique de l'évolution du diamètre des deux rameaux de vigne mesurée par les dendromètres du 26-05 au 08-09. Identification des périodes de chaleurs extrêmes en rouges et de précipitations en bleues (A.Fribault) .....	49
Figure 30 : Photographies de l'inter-rang de vigne et résultats de l'algorithme PlantNet (F.Vinatier) .....	50
Figure 31 : Graphique de l'évolution de l'évapotranspiration de référence moyenne journalière entre le 25-05 et le 07-09. Les événements de chaleurs extrêmes et de fortes précipitations sont encadrés respectivement en rouges et bleues (A.Fribault).....	51
Figure 32 : Graphique de l'évolution du déficit climatique (précipitations - évapotranspiration de référence) sur la période du 25-05 au 07-09. Les fortes précipitations sont encadrées en bleues (A.Fribault) .....	52
Figure 33 : Graphique de l'évolution de l'état de l'humidité du sol sur la période du 25-05 au 07-09. Les fortes précipitations sont encadrées en bleues (A.Fribault) .....	52
Figure 34 : Effet d'une période de vague de chaleur, encadré en pointillé rouge, sur le diamètre de deux rameaux de vigne (A. Fribault) .....	54
Figure 35 : Courbe des précipitations du 25-05 au 07-09 (A.Fribault) .....	54
Figure 36 : Effet d'une forte précipitations, encadré en pointillé bleu, sur le diamètre des rameaux de vigne (A.Fribault). .....	55
Figure 37 : Capture d'écran de l'application Shiny (A.Fribault).....	56
Figure 38 : Carte d'une partie de la France, comprenant les autres parcelles du réseau d'étude MOMAC (MOMAC) .....	61

## **TABLE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Tableau de l'évolution de la répartition des précipitations des différents événements pluvieux classés par intensité de 1976 à 2005 dans le Languedoc-Roussillon (Laget et al., 2008) .....	10
Tableau 2 : Tableau de la catégorisation des régions viticoles d'après l'indice de Huglin (Quenol & Roux, 2021).....	16

Tableau 3 : Principales espèces végétales spontanées les plus représentées dans les vignobles français en pourcentage d'espèces la plus représentée parmi les vignobles étudiés (Gaviglio, 2022).....	19
Tableau 4 : Tableau des jours de chaleurs extrêmes (température supérieure à 35°C), identification des périodes de vague de chaleurs (au moins 3 jours successifs de chaleurs extrêmes). (A.Fribault).....	53


## **TABLES DES ANNEXES**

Annexe 1 : Table phénologie vigne

# Les stades phénologiques de la vigne

L'Institut Français de la Vigne et du Vin conduit des missions de portée générale pour l'ensemble de la filière vitivinicole, dans les domaines de la sélection végétale, de la viticulture, de la vinification et de la mise en marché des produits. L'IFV est implanté dans l'ensemble des bassins viticoles grâce à ses stations régionales.

**Stade A ou 01 ou 00**  
**Bourgeon d'hiver**  
L'oeil de l'année précédente est presque entièrement recouvert par deux écailles protectrices brunâtres.



**Stade B ou 03 ou 05**  
**Bourgeon dans le coton**  
L'oeil gonfle, ses écailles s'écartent et la bourre est très visible. Ce stade suit les pleurs.



**Stade C ou 05 ou 09**  
**Pointe verte**  
L'oeil continue à gonfler et s'allonge. Il présente une pointe verte constituée par la jeune pousse.



**Stade D ou 06 ou 17**  
**Sortie des feuilles**  
Des feuilles rudimentaires rassemblées en rosette apparaissent. Leur base est encore protégée par la bourre progressivement rejetée hors des écailles.



**Stade E ou 09 ou 15**  
**2 à 3 feuilles étalées**  
Les premières feuilles sont totalement déployées et présentent les caractères variétaux. Le rameau est nettement visible.



**Stade F ou 12 ou 53**  
**Grappes visibles**  
Les grappes rudimentaires apparaissent au sommet de la pousse. Quatre à six feuilles étalées sont visibles.



**Stade G ou 15 ou 55**  
**Boutons floraux encore agglomérés**  
Les grappes s'espacent et s'allongent sur la pousse. Les boutons floraux sont encore agglomérés.



**Stade H ou 17 ou 57**  
**Boutons floraux séparés**  
Les boutons floraux sont nettement isolés. La forme typique de l'inflorescence apparaît.



**Stade I ou 23 ou 65**  
**Fleuraison**  
Les capuchons se détachent à la base. Les étamines et le pistil sont visibles. Après ce stade, vient la nouaison des grains.



**Stade K ou 31 ou 75**  
**Petit pois**  
Les grains ont la taille d'un petit pois. Les grappes pendent.



**Stade L ou 33 ou 77**  
**Fermeture de la grappe**  
Les baies atteignent une taille suffisante pour se toucher.



**Stade M ou 36 ou 87**  
**Véraison**  
Les baies s'éclaircissent pour le raisin blanc ou se colorent pour le raisin noir.




**Stade N ou 38 ou 89**  
**Maturité**  
Les baies sont prêtes pour la récolte car elles ont atteint leur maturité technologique.



**Stade O ou 43 ou 93**  
**Début de la chute des feuilles**



**Stade 47 ou 97**  
**Fin de la chute des feuilles à l'automne.**



Depuis 1994, la notation des stades phénologiques de la vigne s'effectue suivant une échelle numérique s'étalant de 1 à 47, établie par **Eichhorn & Lorenz**. Cette échelle complète celle de **Baggiolini**, notée de A à O, surtout au niveau de la floraison. Enfin, il existe une échelle universelle pour toutes les monocotylédones et les dicotylédones, appelée **BBCH** (Biologische Bundesanstalt bundessortennam und Chemical industry). Chaque stade est défini par une lettre et deux chiffres dans l'ordre : **Baggiolini**, **Eichhorn & Lorenz** et **BBCH**.

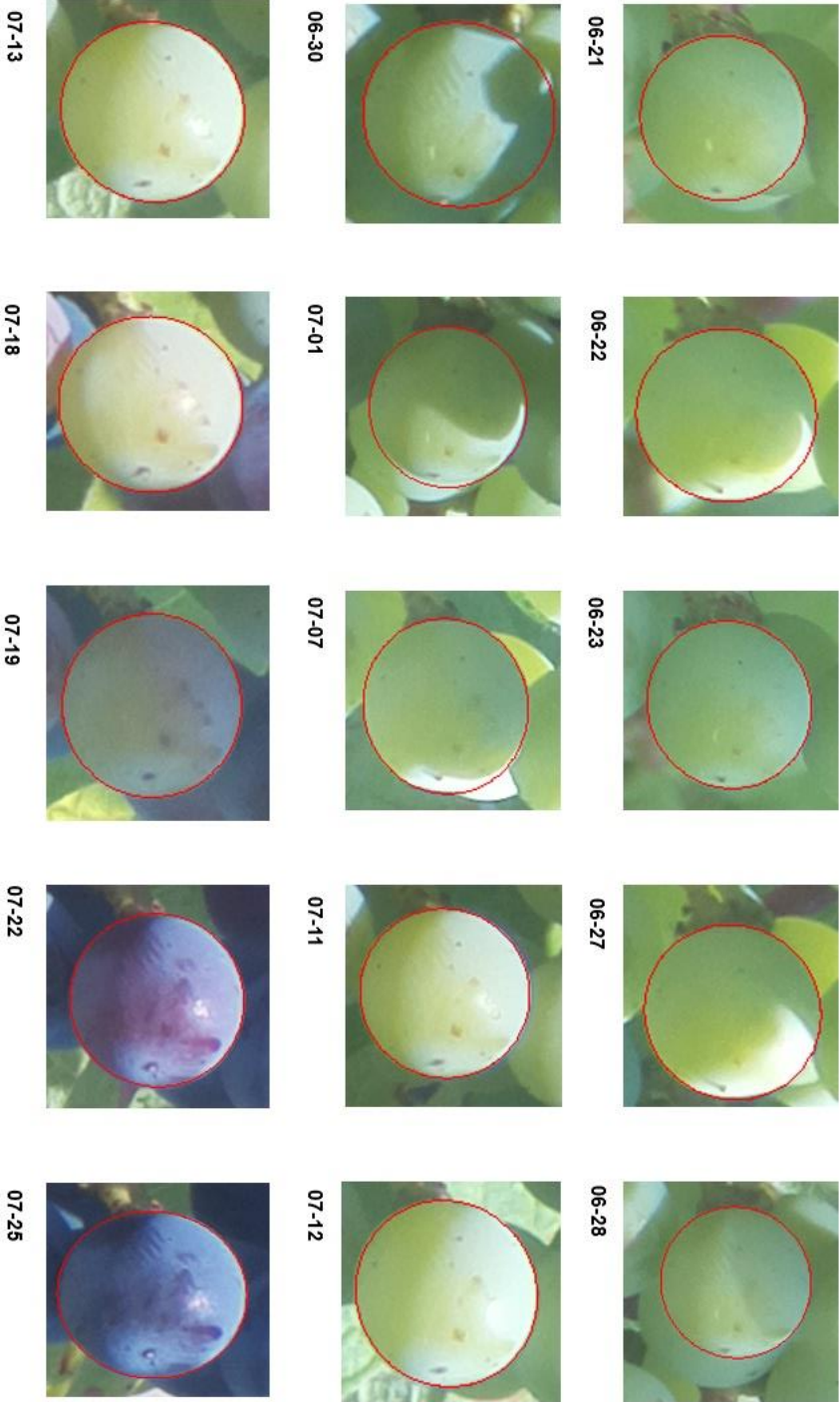
Institut Français de la Vigne et du Vin - Domaine de l'Espiguette - 30240 Le Grau du Roi - [www.vignevin.com](http://www.vignevin.com)

Annexe 2 : Espèces spontanées spécifiques aux vignobles méridionaux (Gaviglio, 2022)

Espèces communes à tous les vignobles	Nom latin	Famille botanique
Ambroisie à feuilles d'armoise	<i>Ambrosia artemisiifolia</i>	Astéracées
Ammi élevé	<i>Ami majus</i>	Apiacées
Bident tripartite	<i>Bidens tripartita</i>	Astéracées
Chiendent pied-de-poule	<i>Cynodon dactylon</i>	Poacées
Chondrille, salade à bûches	<i>Chondrilla juncea</i>	Astéracées
Crépis de Nîmes	<i>Crepis sancta</i>	Astéracées
Crépis fétide	<i>Crepis foetidus</i>	Astéracées
Croix-de-malte	<i>Tribulus terrestris</i>	Zygophyllacées
Digitaire sanguine	<i>Digitaria sanguinalis</i>	Poacées
Diplotaxe fausse roquette	<i>Diplotaxis eruroides</i>	Brassicacées
Érodium bec-de-cigogne	<i>Erodium ciconium</i>	Géraniacées
Érodium fausse mauve	<i>Erodium malachoides</i>	Géraniacées
Inule visqueuse	<i>Inula viscosa</i>	Astéracées
Lampourde glouteron	<i>Xanthium italicum</i>	Astéracées
Lampourde épineuse	<i>Xanthium spinosum</i>	Astéracées
Orpin de Nice, orpin élevé	<i>Sedum sediforme</i>	Crassulacées
Panic pied-de-coq	<i>Echinochloa crus galli</i>	Poacées
Pourpier potager	<i>Portulaca oleracea</i>	Portulacacées
Prêle rameuse	<i>Equisetum ramosum</i>	Équisétacées
Séneçon du Cap	<i>Senecio inaequidens</i>	Astéracées
Sétaire glauque	<i>Setaria pumila</i>	Poacées
Sétaire verte	<i>Setaria viridis</i>	Poacées
Sorgho d'Alep	<i>Sorghum halepense</i>	Poacées

Espèces communes à tous les vignobles	Nom latin	Famille botanique
Andryale à f. entières	<i>Andryala integrifolia</i>	Astéracées
Barbon faux-saccharum, chiendent à balai	<i>Dichanthium saccharoides</i>	Poacées
Barbon pied-de-poule	<i>Dichanthium ischaemum</i>	Poacées
Bardanette en grappe	<i>Tragus racemosus</i>	Poacées
Chardon-marie	<i>Silybum marianum</i>	Astéracées
Coronille queue-de-scorpion	<i>Coronilla scorpioides</i>	Fabacées
Diplotaxe à feuilles ténues	<i>Diplotaxis tenuifolia</i>	Brassicacées
Éragrostis de Barrelier	<i>Eragrostis barrelieri</i>	Poacées
Érigéron de Buenos Aires, vergerette	<i>Conyza bonariensis</i>	Astéracées
Euphorbe dentée	<i>Euphorbia dentata</i>	Euphorbiacées
Euphorbe des garrigues	<i>Euphorbia characias</i>	Euphorbiacées
Galactites cotonneux	<i>Galactiteselegans</i>	Astéracées
Héliotrope d'Europe	<i>Heliotropium europaeum</i>	Borraginacées
Paspale à deux épis	<i>Paspalum distichum</i>	Poacées
Paspale dilaté	<i>Paspalum dilatatum</i>	Poacées
Petit alpiste	<i>Phalaris minor</i>	Poacées
Scabieuse maritime	<i>Sixalix atropurpurea ssp.maritima</i>	Dipsacacées
Sétaire verticillée	<i>Setaria verticillata</i>	Poacées
Tagète	<i>Tagetes minuta</i>	Astéracées
Tordyle élevé	<i>Tordylium maximum</i>	Apiacées
Trèfle bitumineux, psoralie bitumineuse	<i>Bituminaria bituminosa,</i> <i>Aspalthium bituminosum</i>	Fabacées
Urosperme de Daléchamps	<i>Urospermum dalechampi</i>	Astéracées

Annexe 3 : Série de photographie de la même baie. Ellipse produite par l'algorithme de reconnaissance des formes



Annexe 4 : Photographie du 24 mars après l'utilisation de l'algorithme PlantNet

