



HAL
open science

Comment s'adapter au changement climatique et à la hausse des degrés alcooliques par le biais des pratiques culturelles tout en conservant la qualité des vins ?

Marie Houlette

► To cite this version:

Marie Houlette. Comment s'adapter au changement climatique et à la hausse des degrés alcooliques par le biais des pratiques culturelles tout en conservant la qualité des vins?. Agronomie. 2019. dumas-02972238

HAL Id: dumas-02972238

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02972238>

Submitted on 26 Oct 2020

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.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du DIPLOME D'INGENIEUR AGRONOME

Option : Viticulture – Œnologie

**Comment s'adapter au changement climatique et
à la hausse des degrés alcooliques par le biais
des pratiques culturales tout en conservant la
qualité des vins ?**

par Marie HOULETTE

Année de Soutenance : 2019

Organisme d'Accueil : Château de Beaucastel

MINISTERE DE L'AGRICULTURE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du DIPLOME D'INGENIEUR AGRONOME

Option : Viticulture – Œnologie

**Comment s'adapter au changement climatique et
à la hausse des degrés alcooliques par le biais
des pratiques culturales tout en conservant la
qualité des vins ?**

par Marie HOULETTE

**Mémoire préparé sous
la direction de :**
Anne PELLEGRINO

Présenté le :
05/11/2019

Organisme d'accueil :
Château de Beaucastel

Maître de stage :
César PERRIN

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier François et César PERRIN, qui m'ont permis de réaliser ce stage de fin d'étude au sein du Château de Beaucastel et de mettre en place cette étude sur leur domaine.

J'aimerais ensuite remercier Valentin CASTANEDA, régisseur du Château de Beaucastel, pour sa disponibilité et son encadrement. La pertinence de ses conseils a été d'une aide précieuse pour la réalisation de ce projet.

Mes remerciements vont également à Anne PELLEGRINO, enseignante à Montpellier Supagro et tutrice de ce stage, pour son suivi et ses corrections.

De plus, je tiens à remercier toute l'équipe du domaine, à la vigne comme en cave, pour son accueil, sa gentillesse et sa bonne humeur quotidienne qui m'a permis de travailler dans ce cadre chaleureux.

Enfin, je remercie ma famille pour son soutien tout au long de mes études et de ce stage.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	1
TABLE DES MATIERES	3
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	7
TABLE DES ANNEXES.....	11
TABLE DES ABREVIATIONS	13
INTRODUCTION.....	15
CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	17
PARTIE 1 – ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	19
I. LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET SES PERSPECTIVES	19
I.1 Conséquences et origines du réchauffement climatique.....	19
I.2 Perspectives d'évolution du réchauffement climatique.....	21
I.3 Le réchauffement climatique dans les régions viticoles françaises	21
II. CONSEQUENCES DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LA VIGNE ET LA QUALITE DES VINS.....	23
II.1 Impact sur le cycle phénologique de la vigne.....	23
II.2 Impact sur la qualité des baies	25
III. LES LEVIERS D'ACTION A LONG TERME	31
III.1 Modification du matériel végétal	31
III.2 Mise en place du vignoble	33
III.3 Adaptation de la localisation des vignes	35
IV. LES LEVIERS D'ACTION A COURT TERME	35
IV.1 Influence des pratiques œnologiques.....	37
IV.2 Modification du rapport feuille/fruit.....	37
IV.3 Modification de l'interception lumineuse	39
PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODE	41
I. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	41
I.1 La parcelle d'étude	41
I.2 Disposition de l'expérimentation :	43
II. MODALITES ETUDIEES	45
II.1 Diminution du rapport feuille/fruit par Rognage.....	45
II.2 Argile.....	45
II.3 Filets d'ombrage.....	47
III. MESURES EFFECTUEES	47

III.1 Analyse de l'état hydrique.....	47
III.2 Suivi du développement végétatif.....	49
III.3 Suivi de la maturité des baies.....	49
III.4 Récolte.....	51
PARTIE 3 – RESULTATS ET DISCUSSION.....	53
I. LE MILLESIME 2019.....	53
II. ETAT HYDRIQUE DES VIGNES.....	53
II.1 Mesure des températures de feuilles.....	53
II.2 Mesure du potentiel hydrique foliaire de tige (PHFT).....	55
III. LE DEVELOPPEMENT VEGETATIF.....	57
III.1 – La surface foliaire.....	57
III.2 – Suivi du développement des entre-cœurs.....	59
III.3 – Rendement à la récolte.....	59
III.4 – Rapport feuilles/fruits.....	61
I. SUIVI DE MATURATION DES BAIES.....	61
IV.1 Sucres réducteurs et degré probable.....	61
IV.2 Acidité des baies.....	63
IV.3 pH.....	63
IV.4 Indice de maturité.....	63
CONCLUSION.....	65
ANNEXES.....	67
BIBLIOGRAPHIE.....	85

TABLE DES ILLUSTRATIONS

➤ Figures

Figure 1 : Graphique de l'évolution de la température moyenne sur Terre de 1850 à 2000 (Trenberth et al., 2007).....	18
Figure 2 : Carte de l'évolution des précipitations annuelles entre 1901 et 2012 (GIEC, 2015)	18
Figure 3 : Carte de l'évolution des températures de surface sur les terres émergées entre 1951 et 2010 (GIEC, 2015)	18
Figure 4 : Total annuel des émissions anthropiques de GES par groupe de gaz entre 1970 et 2010 (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, 2015).....	18
Figure 5 : Moyennes mondiales des concentrations en GES entre 1750 et 2010 (GIEC, 2015)	20
Figure 6 : Graphique des prévisions de l'évolution des températures (b), de l'étendue de la glace de mer (c), du niveau de la mer (d) et du pH des océans en surface (e) jusqu'en 2100 selon les différents scénarii (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5). (GIEC, 2015)	20
Figure 7 : Evolution de l'indice de Huglin à Avignon entre 1965 et 2005 (Seguin, 2007).....	20
Figure 8 : Schéma du cycle phénologique de la vigne (notation des stades de Baggiolini, 1993).....	22
Figure 9 : Les stades phénologiques de la vigne selon Baggiolini (lettres) et Eichhorn et Lorentz (chiffres). Source : IFV	22
Figure 10 : Evolution des dates de stades phénologiques du Grenache en AOC Côtes du Rhône Villages entre 1976 et 2000 (Bellia et Douguedroit, 2007).....	22
Figure 11 : Evolution de la date de vendange à Châteauneuf-du-pape de 1945 à 2001 (Seguin 2007).....	24
Figure 12 : Schéma de l'évolution des métabolites au sein de la baie de raisin de la floraison à la maturation (Kennedy 2002)	24
Figure 13 : Evolution du taux d'alcool, de l'acidité totale et du pH des mouts en Languedoc entre 1984 et 2013 (Van Leeuwen et Darriet, 2016)	24
Figure 14 : Graphique de l'évolution de la concentration en sucres des baies en fonction de la contrainte hydrique (évaluée par le potentiel de tige à maturité) (V. Leeuwen, Trégoat, et Choné 2003)	28
Figure 15 : Graphique de l'évolution de la concentration en anthocyanes des baies en fonction de la contrainte hydrique (évaluée par le potentiel de tige à maturité) (V. Leeuwen, Trégoat, et Choné 2003)	28
Figure 16 : Graphiques du taux d'alcool potentiel de mout à la vendange en fonction du rapport feuille/fruit chez cinq cépages	36
Figure 17 : Vue satellite de la parcelle choisie et surface correspondante (mesure : geoportail)	40
Figure 18 : Histogramme du nombre moyen de rameaux par pied de vigne et de leur longueur	43
Figure 19 : Histogramme de la température moyenne des feuilles relevée pour chaque modalité ainsi que leur écart-type correspondant	52
Figure 20 : Histogramme des potentiels hydriques foliaires de tiges moyen de chaque modalité avec les écart-types correspondants.....	54
Figure 21 : Histogramme des SECV moyennes de chaque modalité avec les écart-types correspondants.....	56

Figure 22: Diagramme de répartition des entre-cœurs par classe de longueur pour chaque modalité le 31 Juillet.....	58
Figure 23: Diagramme de répartition des entre-cœurs par classe de longueur pour chaque modalité le 9 Août.....	58
Figure 24: Diagramme de répartition des entre-cœurs par classe de longueur pour chaque modalité le 15 Août.....	58
Figure 25: Histogramme du nombre moyen de grappes par pied à la vendange chez chaque modalité	60
Figure 26: Histogramme du poids moyen d'une grappe à la vendange pour chaque modalité a.....	60
Figure 27: Histogramme des rendements moyens à la vendange de chaque modalité.....	60
Figure 28: Histogramme des rapport feuilles/fruits moyens de chaque modalité.....	60
Figure 29: Graphique de l'évolution des concentrations en sucres des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019	62
Figure 30: Graphique de l'évolution des TAP des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019.....	62
Figure 31: Graphique de l'évolution de l'acidité totale des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019.....	62
Figure 32: Graphique de l'évolution de l'acide tartrique des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019.....	64
Figure 33 : Graphique de l'évolution de l'acide malique des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019.....	64
Figure 34: Graphique de l'évolution du pH des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019.....	64
Figure 35 : Graphique de l'évolution de l'Indice de maturité des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019.....	66

➤ Tableaux

Tableau 1 : Classification des climats viticoles en fonction de l'indice de Huglin	23
Tableau 2 : Tableau des caractéristiques de la parcelle choisie.....	41
Tableau 3 : Tableau de valeur des p-value pour les PHFT à l'issu de.....	55
Tableau 4 : Equivalence entre potentiel hydrique et taux de contrainte hydrique	55
Tableau 5 : Tableau de valeur des p-value pour la SECV à l'issu de comparaisons multiples par le test de Wilcoxon réalisé sur R	57
Tableau 6 : Tableau de valeur des p-value pour le nombre de grappes par pied à l'issu de comparaisons multiples par le test de Wilcoxon réalisé sur R.....	61

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Vue satellite des parcelles du Château de Beaucastel sur l'AOC Châteauneuf-du-pape.

Annexe 2 : Vue satellite des parcelles du Château de Beaucastel sur l'AOC Côtes-du-rhône

Annexe 3 : Schéma du dispositif expérimental

Annexe 4 : Photos des différentes modalités mises en place

Annexe 5 : Données météorologique de la station du Château de Beaucastel (Source : FieldClimate)

Annexe 6 : Résultats d'analyse des prélèvement en grappes entre le 20 Août et le 11 Septembre

Annexe 7 : Boxplot des différentes analyses statistiques réalisées sur R

TABLE DES ABREVIATIONS

A1 : Argile dose 1 (20g/l)

A2 : Argile dose 2 (60g/l)

AB : Agriculture Biologique

AOC : Appellation d'Origine Contrôlée

AT : Acidité Totale

BCL : Château de Beaucastel

F : Filets

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat

NOP : National Organic Program

PAR : Photosynthetically Active Radiation

PHFT : Potentiel Hydrique Foliaire de Tige

Pr : Poids de récolte

R : Rognage

RU : Reserve Utile

SECV : Surface Externe de Couvert Végétal

T : Témoin

TAP : Titre Alcoométrique Probable

TAV : Titre Alcoométrique Volumique

UV : Ultraviolet

INTRODUCTION

Depuis quelques années, le changement climatique est devenu un sujet d'actualité majeur. Il se définit aujourd'hui par le phénomène d'augmentation des températures sur Terre ces derniers siècles ce réchauffement étant lié à l'effet de serre.

Le phénomène d'effet de serre a été découvert à la fin du 19^e siècle par Svante Arrhenius qui met en évidence qu'un air riche en gaz carbonique retient davantage l'énergie des rayonnements solaires, ce qui conduit à une augmentation de la température de l'air environnant. En effet, le rayonnement solaire est en partie absorbé par le sol et les océans et en partie renvoyé dans l'atmosphère sous forme de rayons infrarouges. Certains gaz de l'atmosphère, appelés gaz à effet de serre (GES), renvoient ce rayonnement vers la Terre ce qui est responsable du réchauffement de la planète. Il s'agit d'un phénomène nécessaire à la vie sur Terre pour réguler la température naturellement. Cependant celui-ci s'est accentué de manière inquiétante ces dernières années avec la hausse des taux de gaz à effet de serre dans l'air (Maslin, 2014). Le CO₂ est incontestablement le gaz à effet de serre principal même si d'autres gaz sont à l'origine de cet effet tels que le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), l'ozone (O₃), la vapeur d'eau (H₂O), le protoxyde d'azote (NO₂) ou encore les gaz fluorés.

La vigne vivant en interaction avec son environnement, le climat l'affecte de manière particulièrement importante. Le réchauffement climatique est ainsi à l'origine de modifications du comportement de la vigne dans chaque région viticole, en relation notamment avec l'augmentation des températures.

L'étude qui suit se déroule dans la région viticole des Côtes-du-rhône méridionales, dans le département du Vaucluse, au Château de Beaucastel. Cette région du sud de la France se voit particulièrement touchée par le réchauffement climatique. En effet, le climat qui était idéalement chaud et propice à la culture de la vigne il y a 50 ans, est devenu aujourd'hui très chaud et sec ce qui a des conséquences sur la viticulture de la région et la qualité des vins obtenus. Une problématique majeure de la région est notamment le degré alcoolique des vins qui augmente d'année en année en réponse à l'évolution du climat.

C'est dans ce contexte que la famille Perrin, propriétaires du Château de Beaucastel, souhaite s'interroger sur les possibles alternatives permettant de lutter contre le réchauffement climatique.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Présentation du vignoble

Le Château de Beaucastel est situé sur la commune de Courthézon dans le département du Vaucluse. Il s'étend sur 130ha dont 100ha cultivés en vignes, sur l'AOC Châteauneuf-du-pape (70ha) et l'AOC Côtes-du-rhône (30ha). Le climat est d'influence méditerranéenne. Celui-ci est chaud, sec et particulièrement venté. En effet la région est très fréquemment touchée par le Mistral correspondant à un vent septentrional froid et souvent violent.

Les parcelles du domaine sont localisées autour du château en un seul bloc (Annexe 1 et 2). Les sols de l'appellation Châteauneuf-du-pape sont profonds, de texture argilo-calcaire et présentent jusqu'à 50% de galets roulés dans les premiers horizons. En appellations Côtes-du-Rhône, les parcelles présentent une texture un peu plus limoneuse.

L'encépagement comprend les treize cépages autorisés dans l'appellation Châteauneuf-du-pape. En rouge, le cépage majoritaire est le Grenache (40%) puis la Syrah (25%) et le Mourvèdre (25%). En blanc la Roussanne est majoritaire. En Côtes-du-rhône, d'autres cépages ont été plantés tels que le Carignan en rouge et la Marsanne et le Viognier en blanc.

Le domaine est conduit en agriculture biologique depuis 1950. Il est aujourd'hui certifié AB (Agriculture Biologique) et NOP (National Organic Program). La biodynamie est également pratiqué sur le domaine même si celui-ci n'est pas certifié.

Les vignes sont pour la plupart conduites en gobelet avec une densité de 2m sur 2m. Seules les parcelles de Syrah ainsi que certaines parcelles en AOC Côtes-du-Rhône sont conduites en cordon bilatéral ou en guyot simple palissé.

Le sol est travaillé mécaniquement sous le rang et dans l'inter-rang et les travaux en vert (épamprage, ébourgeonnage, écimage, attachage) sont réalisés manuellement.

Problématique et démarche expérimentale

Afin de lutter contre l'augmentation des degrés alcooliques de leurs vins, la famille Perrin cherche à mettre en place des leviers d'action, notamment dans la conduite du vignoble, qui aboutisse à des teneurs en sucres inférieures aux teneurs élevées actuelles, sans que cela nuise à la qualité des vins produits. Ceci mène à la problématique suivante :

Comment s'adapter au changement climatique et à la hausse des degrés alcooliques par le biais des pratiques culturales tout en conservant la qualité des vins ?

Nous allons ainsi nous intéresser dans une première partie aux conséquences du réchauffement climatique et aux différents leviers d'action pouvant être sollicités afin de lutter contre ce phénomène. Nous étudierons ensuite la mise en place de l'expérimentation réalisée au Château de Beaucastel et enfin les résultats que celle-ci nous a apportée.

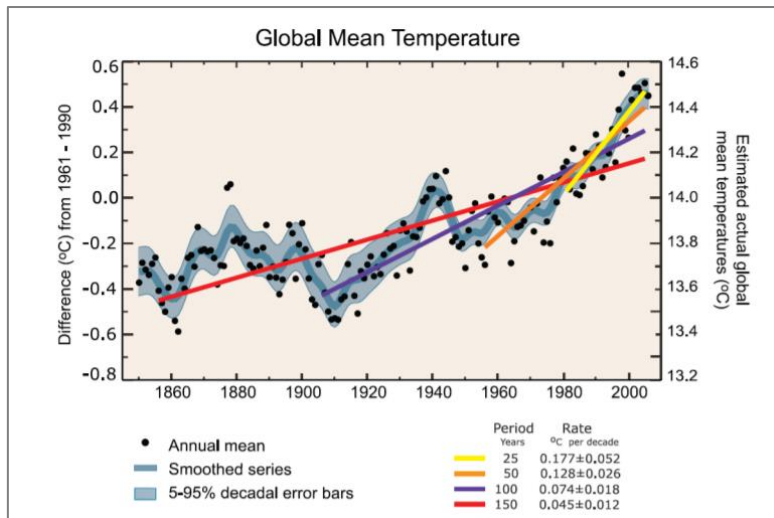


Figure 1 : Graphique de l'évolution de la température moyenne sur Terre de 1850 à 2000 (Trenberth et al., 2007)

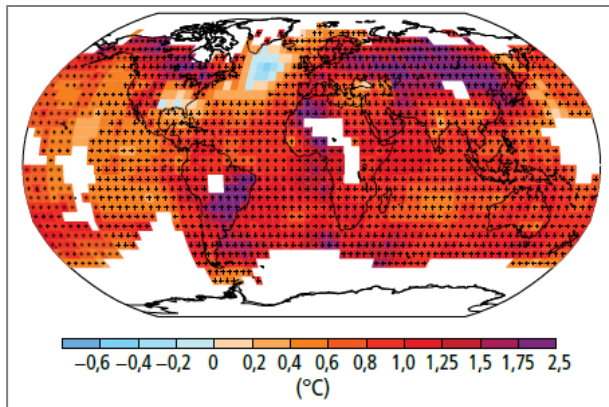


Figure 3 : Carte de l'évolution des températures de surface sur les terres émergées entre 1951 et 2010 (GIEC, 2015)

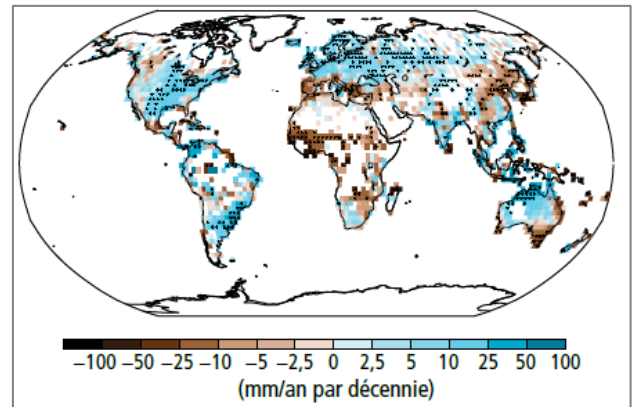


Figure 2 : Carte de l'évolution des précipitations annuelles entre 1901 et 2012 (GIEC, 2015)

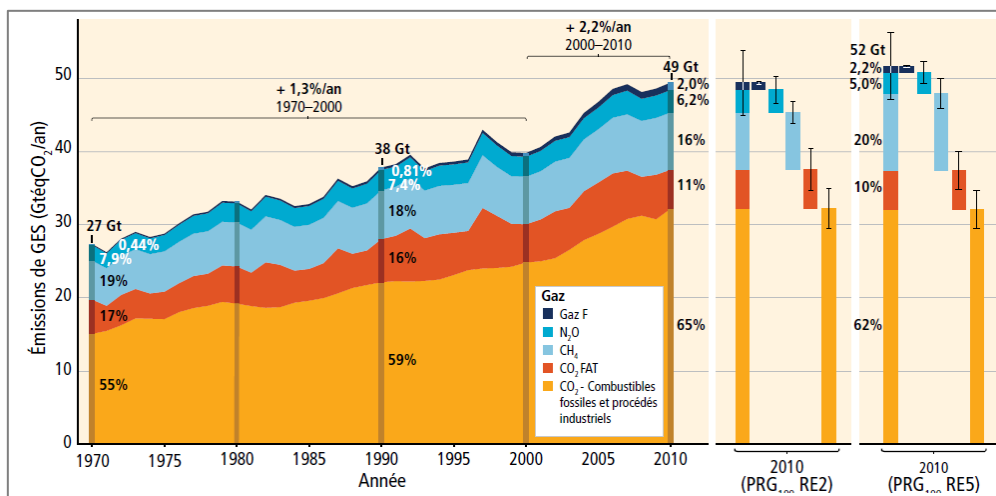


Figure 4 : Total annuel des émissions anthropiques de GES par groupe de gaz entre 1970 et 2010 (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, 2015)

PARTIE 1 – ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET SES PERSPECTIVES

Afin de répondre à la problématique étudiée et de lutter efficacement contre le réchauffement climatique, nous cherchons tout d'abord à comprendre comment celui-ci se manifeste : quels sont les facteurs climatiques mis en jeu, quelles sont les raisons des évolutions climatiques observées et comment vont-elles évoluer ?

I.1 Conséquences et origines du réchauffement climatique

Les changements observés

Depuis la fin du 19^e siècle, des changements importants du système climatique ont pu être observés sur Terre. En effet le dernier rapport du GIEC, publié en 2015, fait état d'un réchauffement de 0,85°C en moyenne des températures de surface (terres émergées et océans) entre 1880 et 2012 (GIEC, 2015) comme on peut le voir également sur les Figure 1 et 3. Le GIEC signale également une diminution du nombre de journées et de nuits froides et une augmentation du nombre de journées et de nuits chaudes sur Terre. Le réchauffement serait par ailleurs plus marqué dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud, notamment du fait de la surface continentale plus importante au nord.

D'autre part, on assiste à un dérèglement des facteurs climatiques telles que les précipitations dont on ne sait pas prévoir précisément l'évolution (Moisselin et al., 2002). Le GIEC rapporte cependant que la fréquence et l'intensité des épisodes de fortes précipitations a augmenté en Amérique du Nord et en Europe (Figure 2). De même, une proportion importante de phénomènes climatiques extrêmes comme des inondations, des tempêtes ou encore des ouragans a été observée. La réduction des masses glaciaires ainsi qu'une hausse du niveau de la mer de 0,20m depuis 1901 sont également des conséquences directes de la hausse des températures (GIEC, 2015).

Enfin on observe une évolution importante des écosystèmes et de la biodiversité qui s'adaptent au climat. Ceci est un marqueur de plus du dérèglement climatique qui a lieu aujourd'hui.

Origines de ces perturbations

L'origine de ces changements climatiques a été longuement étudiée et débattue mais le GIEC atteste que ce sont les activités humaines qui en sont majoritairement responsables. En effet l'homme envoie de grandes quantités de GES dans l'atmosphère du fait de ses activités notamment industrielles. C'est le CO₂ qui est le gaz le plus rejeté à 77% dû à l'utilisation d'énergies fossiles comme le pétrole ou le charbon (Figure 4). On atteint aujourd'hui des taux de 400ppm de CO₂ dans l'air, alors qu'ils s'élevaient à environ 280ppm à la fin du 19^e siècle, ce qui représente une hausse de +40% (GIEC, 2015). Le méthane est également rejeté en masse par l'agriculture intensive et les décharges.

Il est d'autant plus inquiétant d'observer que les émissions de GES et ainsi le réchauffement climatique de la planète se sont fortement accentués ces dernières cinquante années (Figure 5), l'augmentation du CO₂ de l'air entre 2002 et 2011 ayant atteint une élévation de +2ppm/an.(GIEC, 2015)

De plus, les pratiques de déforestation accentuent le phénomène, le CO₂ étant un élément essentiel capté par les plantes pour vivre.

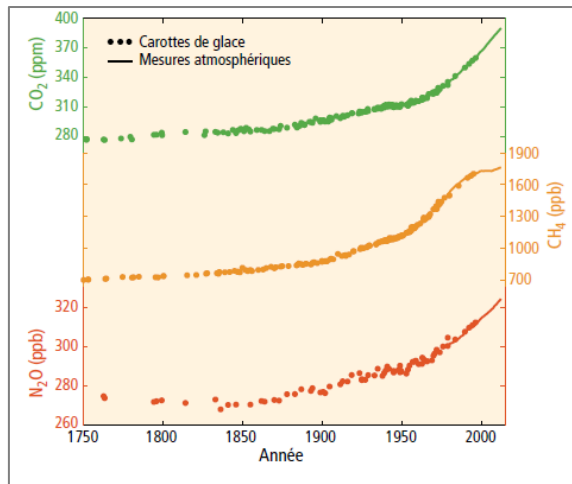


Figure 5: Moyennes mondiales des concentrations en GES entre 1750 et 2010 (GIEC, 2015)

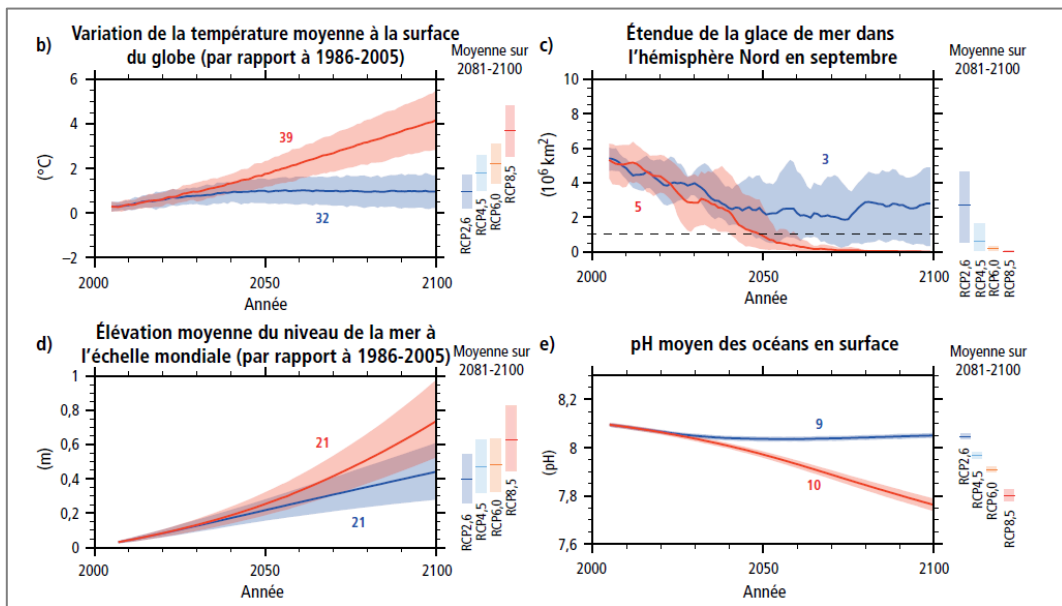


Figure 6: Graphique des prévisions de l'évolution des températures (b), de l'étendue de la glace de mer (c), du niveau de la mer (d) et du pH des océans en surface (e) jusqu'en 2100 selon les différents scénarii (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5). (GIEC, 2015)

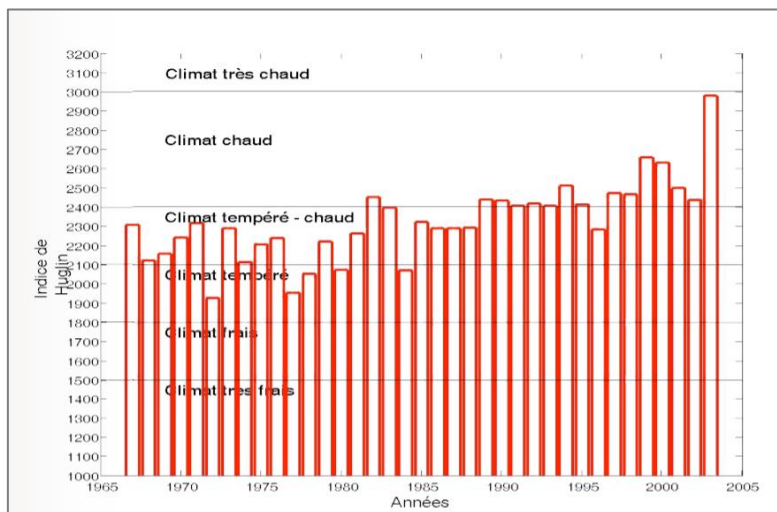


Figure 7: Evolution de l'indice de Huglin à Avignon entre 1965 et 2005 (Seguin, 2007)

I.2 Perspectives d'évolution du réchauffement climatique

L'évolution du système climatique dépend aujourd'hui de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre. Si celles-ci continuent d'augmenter, le réchauffement se poursuivra et les conséquences climatiques pourraient être très importantes. Quatre scénarii ont ainsi été établis par le GIEC selon l'évolution des émissions et concentrations atmosphériques de GES : un scénario en cas de diminution importante des émissions de GES (RCP2,6), deux scénarios intermédiaires (RCP4,5 et RCP6,0) et un scénario prévoyant des émissions de GES très élevées (RCP8,5). Les scénarios qui ne prévoient pas d'efforts supplémentaires pour réduire les émissions (« scénarios de référence ») mènent à des profils situés entre le RCP6,0 et le RCP8,5.

Comme le montre la Figure 6, la planète pourrait subir une augmentation de sa température moyenne allant jusqu'à +4°C en 2100, une fonte de la totalité de la masse glaciaire ainsi qu'une hausse du niveau de la mer de 75cm accompagné d'une modification importante de son pH.

I.3 Le réchauffement climatique dans les régions viticoles françaises

Le réchauffement climatique est global et impacte ainsi le climat de chaque région viticole en France et ailleurs. Les conséquences sur les terroirs des différents vignobles français pourraient ainsi être majeures.

Afin d'évaluer le type de climat d'une région et son aptitude pour la viticulture, l'indice héliothermique de Huglin est notamment utilisé. Cet indice, développé par Huglin en 1978, permet de classer les différents vignobles dans des catégories allant de Climat frais à Climat très chaud (Tableau 1). Pour cela il estime la période par jour durant laquelle le métabolisme de la vigne sera le plus actif. Le calcul se réalise uniquement sur la période végétative du 1^{er} Avril au 30 Septembre pour l'hémisphère Nord et un coefficient k permet de prendre en compte la longueur du jour. (Bourguignon, 2015)

Un des objectifs principaux de cet indice est de faire coïncider le type de climat d'une région avec les cépages adéquates, c'est-à-dire ceux qui se développent de manière optimale dans ce type de climat.

Calcul de l'indice de Huglin (Bourguignon, 2015)

$$\text{Indice Héliothermique d'Huglin} = k \cdot \sum_{01.04}^{30.09} \frac{(T_{\text{moy}}-10)+(T_{\text{max}}-10)}{2}$$

- T_{moy} (°C) : température moyenne de l'air
- T_{max} (°C) : température maximale de l'air
- k : coefficient de longueur du jour

Aujourd'hui on assiste à une augmentation des valeurs de l'indice de Huglin chez la totalité des régions viticoles en France. La

Figure 7 montre ainsi l'évolution du climat de Avignon d'un climat tempéré-chaud à un climat chaud, évoluant progressivement vers un climat très chaud.

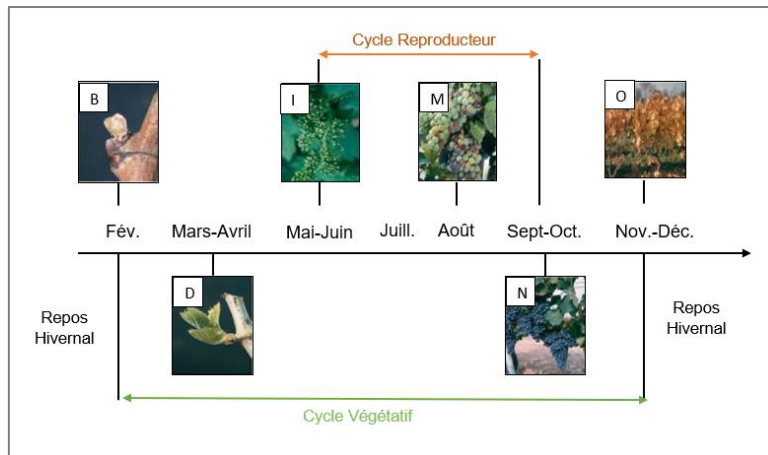


Figure 8 : Schéma du cycle phénologique de la vigne (notation des stades de Baggiolini, 1993)

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 viticole, 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.

<p>Stade A en 01 ou 09 Échecs de l'arbre. L'œil de l'année précédente est protégé par deux écailles protectrices.</p>	<p>Stade B en 03 ou 09 Pousse verte dans le cotyle. L'œil grandit, les écailles s'écroulent et la bourge est peu visible. Ce stade voit les plants.</p>	<p>Stade C en 05 ou 09 Pousse verte dans le cotyle. L'œil continue à grandir et à s'écarter. Il présente une pointe verte couronnée par la jeune pousse.</p>	<p>Stade D en 06 ou 12 Sorte des feuilles. Des feuilles rudimentaires apparaissent. Les bourgeons sont encore protégés par la bourge progressivement après l'écaillement.</p>	<p>Stade E en 09 ou 13 Les bourgeons s'ouvrent. Les bourgeons sont totalement dégagés et présentent des caractères variables. Le rameau est totalement visible.</p>
<p>Stade F en 12 ou 15 Chapeaux visibles. Les bourgeons s'ouvrent et se couvrent de la pousse. Quant à la feuille, elle est encore invisible.</p>	<p>Stade G en 14 ou 15 Bourgeons. Les bourgeons s'ouvrent et s'écarter. Les bourgeons sont totalement dégagés.</p>	<p>Stade H en 17 ou 17 Bourgeons. Les bourgeons sont totalement dégagés. La forme typique de l'inflorescence apparaît.</p>	<p>Stade I en 18 ou 18 Floraison. Les bourgeons sont protégés par la feuille qui s'écarter. Les bourgeons sont totalement dégagés.</p>	<p>Stade J en 21 ou 21 Pédoncules. Les grappes ont la taille d'un petit pois. Les grappes pendent.</p>
<p>Stade K en 23 ou 23 Pédoncules. Les grappes ont la taille d'un petit pois. Les grappes pendent.</p>	<p>Stade L en 24 ou 24 Pédoncules. Les grappes ont la taille d'un petit pois. Les grappes pendent.</p>	<p>Stade M en 26 ou 26 Pédoncules. Les grappes ont la taille d'un petit pois. Les grappes pendent.</p>	<p>Stade N en 28 ou 28 Pédoncules. Les grappes ont la taille d'un petit pois. Les grappes pendent.</p>	<p>Stade O en 31 ou 31 Pédoncules. Les grappes ont la taille d'un petit pois. Les grappes pendent.</p>

Depuis 1994, la notation des stades phénologiques de la vigne s'effectue suivant une échelle annuelle s'étendant de 1 à 47, établie par Eichhorn & Lorentz. Cette échelle complète celle de Baggiolini, soit de A à O, notant au niveau de la Bourge, l'écaillement, la sortie de la bourge, la floraison, la formation de la grappe, le début de la récolte, la récolte, la vendange, la vinification, la mise en marché des produits.

IFV Institut Français de la Vigne et du Vin - Domaine de l'Espiguette - 30240 Le Gras du Roi - www.vignevin.com

Figure 9 : Les stades phénologiques de la vigne selon Baggiolini (lettres) et Eichhorn et Lorentz (chiffres). Source : IFV

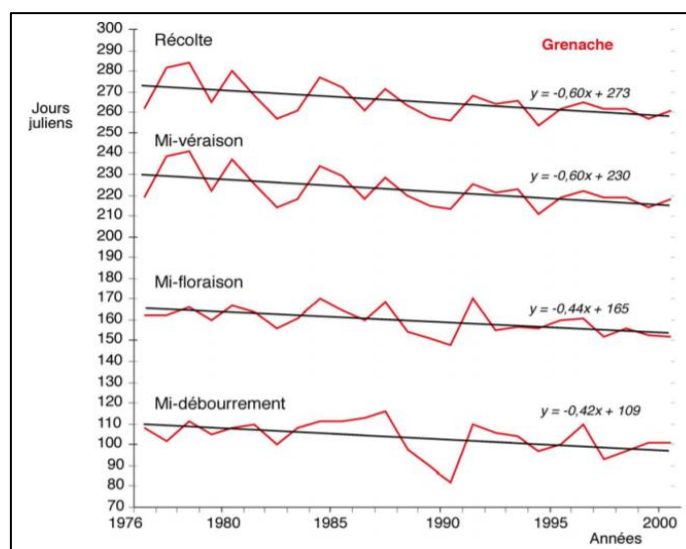


Figure 10 : Evolution des dates de stades phénologiques du Grenache en AOC Côtes du Rhône Villages entre 1976 et 2000 (Bellia et Dougedroit, 2007)

Tableau 1 : Classification des climats viticoles en fonction de l'indice de Huglin

Type de climat	Valeur de l'indice de Huglin
Climat très chaud	IH > 3000
Climat chaud	2400 < IH < 3000
Climat tempéré chaud	2100 < IH < 2400
Climat tempéré	1800 < IH < 2100
Climat frais	1500 < IH < 1800
Climat très frais	IH < 1500

BILAN I :

Le changement climatique est dû à une augmentation des GES, notamment le CO₂, ce qui est essentiellement la conséquence des activités humaines. Les principaux facteurs impactés sont les températures de surface qui augmentent, la pluviométrie ainsi que le nombre d'évènements climatiques extrêmes. Au vu des perspectives d'évolution, les conséquences sur les climats des régions viticoles pourraient être très importantes et remettre en question la culture de la vigne.

II. CONSEQUENCES DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LA VIGNE ET LA QUALITE DES VINS

Après avoir évalué les conséquences du changement climatique à grande échelle, nous nous intéressons maintenant à son effet sur la vigne en nous basant sur les modifications qu'il provoque sur les facteurs climatiques tels que le taux de CO₂, la température et la pluviométrie.

II.1 Impact sur le cycle phénologique de la vigne

Le réchauffement climatique a un impact considérable sur la phénologie de la vigne (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), notamment sur les dates de levée de dormance, de débourrement, de floraison, de véraison et de récolte. En effet ces dernières sont directement liées à la température du milieu.

Dans un premier temps, la levée de dormance des bourgeons nécessite une température minimale ne dépassant pas 10°C pendant au moins sept jours consécutifs (Pouget, 1963).

Par la suite, la date de débourrement est conditionnée par l'apparition de températures favorables généralement au printemps. Ainsi, plus les températures seront élevées à la sortie de l'hiver, plus le débourrement sera précoce.

Les dates de floraison, de véraison et de récolte découlent de la date de débourrement et de la somme des températures depuis le début du cycle qu'on mesure généralement en degrés jour (somme des degrés au dessus du zéro de végétation c'est-à-dire 10°C pour la vigne).

Par ailleurs, la floraison n'a généralement pas lieu tant que les températures n'atteignent pas 18-20°C, de même que la nouaison qui est ralentie à 15°C, notamment du fait du ralentissement de la germination du pollen.

En conséquence de l'augmentation des températures on assiste ainsi à un décalage du cycle phénologique de la vigne qui est de plus en plus précoce, chaque stade phénologique se déroulant plus tôt du fait des sommes de températures qui sont atteintes plus rapidement (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

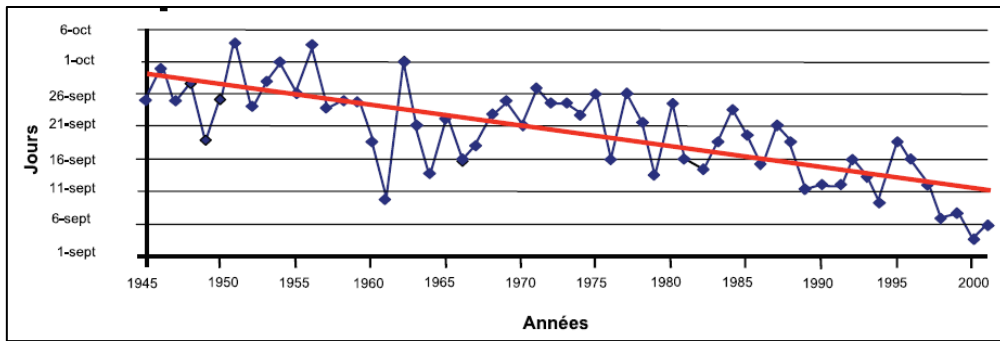


Figure 11: Evolution de la date de vendange à Châteauneuf-du-pape de 1945 à 2001 (Seguin 2007)

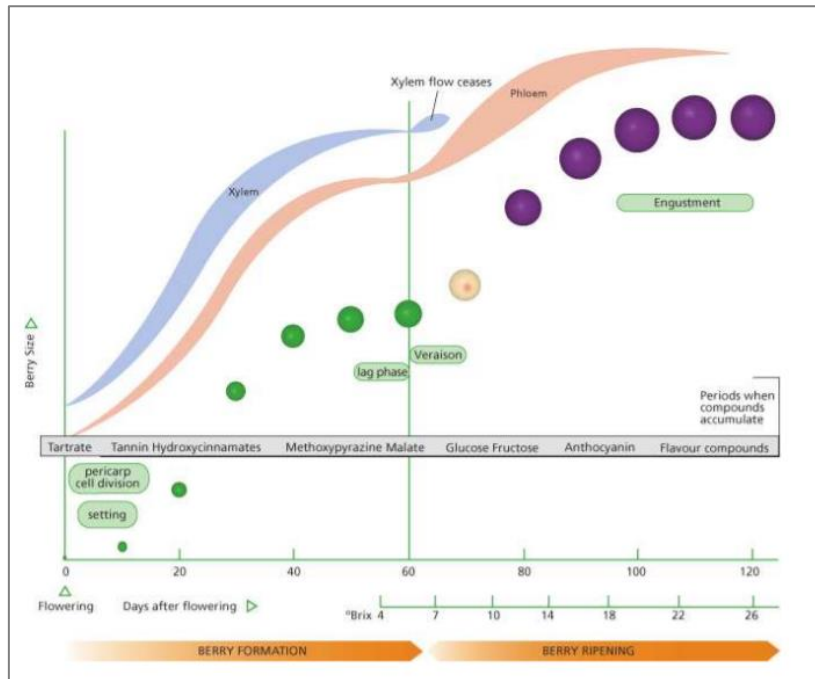


Figure 12: Schéma de l'évolution des métabolites au sein de la baie de raisin de la floraison à la maturation (Kennedy 2002)

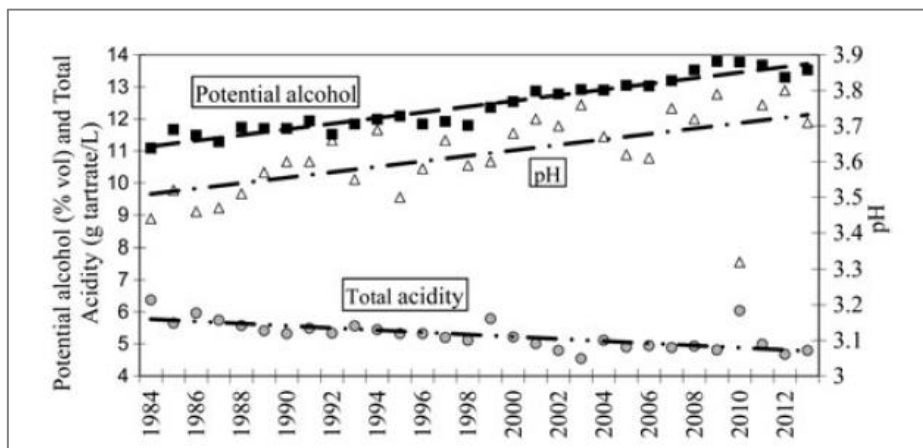


Figure 13: Evolution du taux d'alcool, de l'acidité totale et du pH des mouts en Languedoc entre 1984 et 2013 (Van Leeuwen et Darriet, 2016)

Il reste à noter que des températures trop basses ou encore trop hautes peuvent provoquer un ralentissement voire un arrêt du cycle végétatif de la vigne et de la succession des différents stades phénologiques. Le réchauffement climatique peut ainsi mener à plusieurs scénarii très différents selon les zones géographiques et les températures atteintes.

Enfin, du fait du décalage du cycle phénologique de la vigne, la période de maturation des raisins qui se déroulait habituellement en début d'automne, se déroule maintenant à la fin ou au milieu de l'été lorsque les températures sont plus élevées. L'effet du réchauffement climatique est ainsi encore plus prononcé, celui-ci étant déjà plus important sur la période estivale (GIEC, 2015). Les dates de récoltes ont ainsi été avancées de deux à trois semaines en seulement cinquante ans, notamment dans le sud de la France comme à Châteauneuf-du-pape (Figure 11). Pourtant les producteurs de vins cherchent aujourd'hui plutôt à vendanger un peu tard afin d'obtenir une légère surmaturation, en relation avec l'évolution du goût des consommateurs (Mira de Orduña, 2010).

Pour conclure, le réchauffement climatique impacte les stades phénologiques et décale ainsi la période de maturation du raisin qui se déroule donc plus tôt et dans des conditions plus chaudes ce qui induit des modifications importantes au niveau de la qualité des baies.

II.2 Impact sur la qualité des baies

Pendant la maturation du raisin, on assiste à une augmentation des sucres, des acides aminés, des composés phénoliques et du potassium. En parallèle il y a une diminution des acides, notamment de l'acide malique. (Figure 12)

Le réchauffement climatique agit sur la maturation des baies et leur composition finale en métabolites par le biais de trois facteurs principaux que sont le taux de CO₂ de l'air, la température et la disponibilité en eau pour les vignes.

Effet du CO₂ :

Une augmentation de la teneur en CO₂ de l'air a dans un premier temps pour effet une stimulation de la photosynthèse (Lebon, s. d.) ce qui aboutirait à une production de biomasse importante et à un rendement potentiel plus élevé. Cependant par la suite une régulation de la photosynthèse se met en place et limite cet effet naturellement. (Lebon, s. d.)

D'autre part dans le cadre du réchauffement climatique, l'effet du CO₂ est limité par l'effet de la température élevée et du déficit hydrique qui ont plutôt tendance à diminuer l'activité photosynthétique.

L'effet de la teneur en CO₂ de l'air sur le développement des baies et leur maturation est assez faible et mal connu. Il ne semble pas être à l'origine de différence de taux de métabolites au sein des baies.

Effet de la température

La température a un effet assez important sur le taux de métabolites produits et leur accumulation dans les baies. En effet des températures élevées pendant la maturation accélèrent le processus d'accumulation en sucres et de diminution des acides dans les baies. (Mira de Orduña, 2010). C'est ainsi qu'on observe avec le réchauffement climatique une augmentation des degrés alcooliques et une diminution des acidités des vins (**Erreur ! Source d u renvoi introuvable.**).

En ce qui concerne l'acidité, l'acide malique est très affecté par la température et diminue rapidement quand les températures montent. D'autre part, le taux de potassium entrant dans

les baies pendant la maturation est plus important en cas de hautes températures. Le potassium entrant par des transporteur K^+/H^+ ATPase, son entrée fait diminuer le taux d'atome H^+ dans les baies et augmente ainsi le pH de celles-ci. (Mira de Orduña, 2010)

Pour ce qui est du taux de sucres dans les baies, l'effet de la température sur leur quantité finale est faible, la température jouant principalement sur la cinétique d'accumulation (Mira de Orduña, 2010)

Dans le cadre du réchauffement climatique, la recherche de la qualité des baies se fait non seulement grâce à la maturité technologique liée aux taux de sucres et d'acides (rapport sucres/acides) mais aussi grâce à la maturité phénolique, qui est de plus en plus recherchée aujourd'hui. Cette dernière est encore complexe à définir précisément mais elle témoigne de la qualité des anthocyanes et des tannins. (Vivas et al., s. d.).

L'effet de températures plus élevées sur les polyphénols n'est pas le même que sur les sucres et acides. En effet en climat chaud la formation notamment d'anthocyanes est souvent inhibée. Il a été observé que le taux d'anthocyanes était maximal pour des températures comprises entre 17°C et 26°C alors que le taux de sucres est maximal pour des températures comprises entre 25°C et 30°C. Les basses températures favoriseraient la coloration et l'expression aromatique (Van Leeuwen, 2010).

Le réchauffement climatique favorise donc une maturité technologique bien plus précoce alors que la maturité phénolique a tendance à être retardée.

Par ailleurs, la température a un effet complexe sur le développement des arômes et précurseurs d'arômes, certains étant favorisés au détriment d'autres. Ceci aboutit à un effet organoleptique important chez les vins produits. Par exemple, des températures élevées favorisent le développement de la 1,1,6-triméthyl-1,2-dihydronaphthalène (TDN), molécule responsable de l'arôme pétrolé du Riesling. Cependant celles-ci défavorisent le développement de la rotundone qui donne l'arôme poivré chez la Syrah (Van Leeuwen et Darriet, 2016) ou encore des thiols notamment chez le Sauvignon blanc (Mira de Orduña 2010). Les arômes des cépages blancs se développeraieent mieux dans des climats plus frais. Cependant les mécanismes sont très complexes et liés à de nombreux facteurs (Mira de Orduña 2010).

Il est également intéressant d'observer qu'une trop forte augmentation des températures diminue voire arrête l'activité photosynthétique et l'accumulation des métabolites. En effet à partir de 25°C la photosynthèse diminue et au-dessus de 30°C le processus métabolique et même l'accumulation en sucre ralentit voire s'arrête.

L'effet de la température sur la qualité des baies est ainsi très important et le réchauffement climatique a pour conséquence des cépages de moins en moins adaptés à leur région et une typicité des vins fortement impactée.

La composition différente des raisins à la récolte, très souvent plus sucrés et moins acides, engendre des difficultés.

D'une part les pH élevés des mouts et des vins les exposent à de possible risques de contaminations par les microorganismes, notamment si les températures sont hautes (Mira de Orduña 2010). Les vins produits sont également moins stables, susceptible de subir des déviations plus facilement à moins d'augmenter les doses de sulfites (Van Leeuwen et Darriet 2016)

D'autre part les teneurs en sucres importantes peuvent poser problème au cours de la fermentation. Les levures, sensibles à la quantité d'alcool dans leur environnement, peuvent

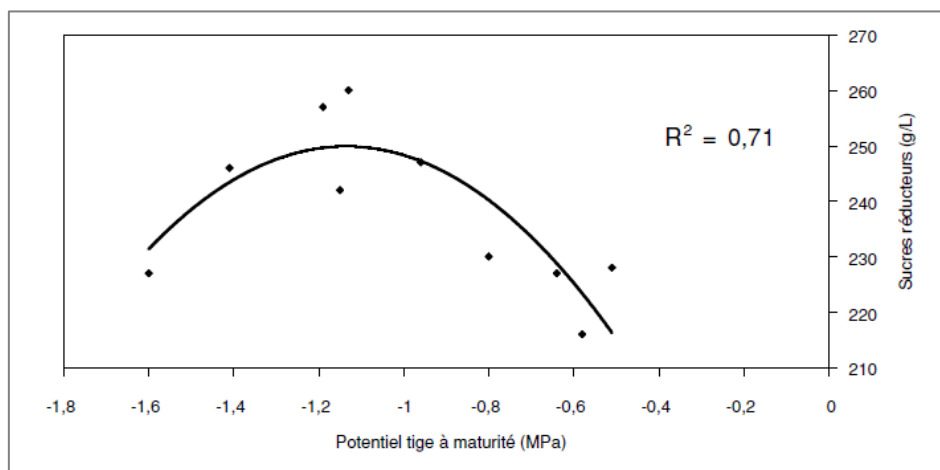


Figure 14: Graphique de l'évolution de la concentration en sucres des baies en fonction de la contrainte hydrique (évaluée par le potentiel de tige à maturité) (V. Leeuwen, Trégoat, et Choné 2003)

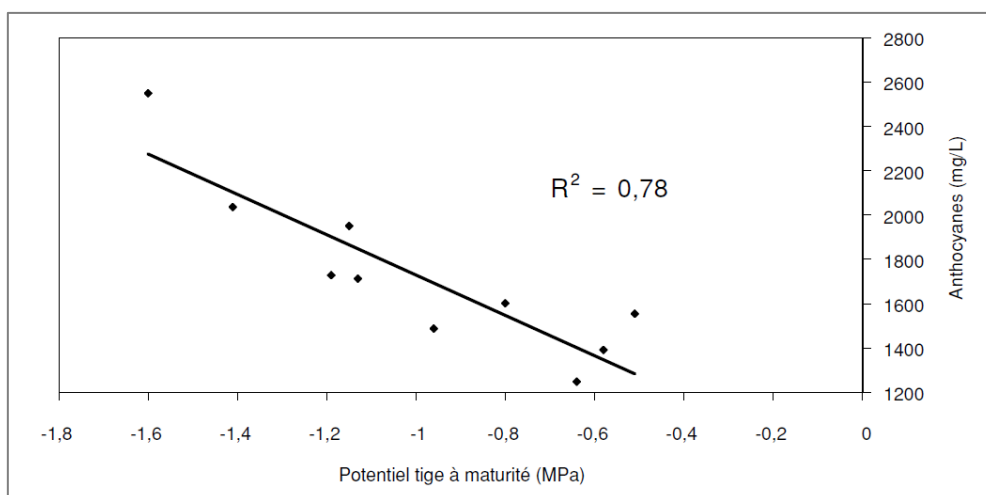


Figure 15: Graphique de l'évolution de la concentration en anthocyanes des baies en fonction de la contrainte hydrique (évaluée par le potentiel de tige à maturité) (V. Leeuwen, Trégoat, et Choné 2003)

mourir et ne pas terminer la fermentation, laissant ainsi des sucres résiduels dans le vin. Les fermentations sont également susceptibles d'être plus longues avec plus de formation d'acide acétique et de glycérol. De même pour la fermentation malolactique qui peut être ralentie voire bloquée. Dans ce cas, le retardement de l'élevage et des opérations de stabilisation peut exposer le vin à plus de risques de déviations (Mira de Orduña 2010).

Hormis les risques plus importants, c'est également la typicité du vin qui est fortement impactée. Les hautes teneurs en sucre aboutissent à la formation d'une grande quantité d'alcool issu de la fermentation. Les vins sont ainsi déséquilibrés car souvent trop alcoolés et peu acides.

Effet du déficit hydrique :

Le déficit hydrique n'est pas une conséquence directe du changement climatique, cependant il est étroitement lié avec la température et s'avère ainsi être une conséquence indirecte.

L'état hydrique des vignes est lié à la structure de la végétation, à la réserve en eau du sol, qui dépend notamment de sa texture et de sa profondeur, et aux facteurs climatiques.

Son évolution avec le réchauffement climatique est difficilement prévisible du fait de l'imprécision de la pluviométrie à l'avenir. Cependant concernant la réserve en eau du sol, la hausse des températures entraîne l'augmentation de l'évapotranspiration du sol, cette réserve sera donc probablement diminuée à l'avenir, même si la pluviométrie reste identique. Le déficit hydrique sera d'autant plus important si les précipitations diminuent (Van Leeuwen et Darriet, 2016).

L'état hydrique d'une plante influence directement l'expansion cellulaire et le contrôle de l'ouverture stomatique. Il s'agit d'une adaptation naturelle de celle-ci à la sécheresse par modulation des flux d'eau. La vigne est particulièrement adaptée à la sécheresse car elle présente un enracinement profond. (Lebon E. et al., 2014)

Lorsque la plante est soumise à un stress hydrique, son activité photosynthétique diminue de manière importante. Son développement végétatif s'arrête précocement ce qui limite la surface de couvert végétal et donc l'interception du rayonnement lumineux. Les assimilats sont alors redirigés vers les fruits. Il y a également fermeture des stomates ce qui limite la transpiration et donc les pertes en eau. Cependant en cas de déficit trop important, un endommagement voire une sénescence des feuilles peut avoir lieu et ainsi bloquer la maturation des baies par le déficit carboné engendré (Lebon E. et Garcia de Cortazar-Atauri I., 2014).

La corrélation entre qualité du vin et déficit hydrique est très importante. En effet, on observe sur la Figure 14 que la concentration en sucres en cas de contrainte hydrique modérée est supérieure à la concentration en sucres en l'absence de contrainte. On remarque également que cette concentration diminue de nouveau en cas de stress hydrique important. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la proportion de carbohydrates disponibles pour les baies en cas de stress hydrique modéré (arrêt du développement végétatif et réallocation des assimilats vers les baies).

D'autre part la Figure 15 met en évidence l'augmentation de la concentration en anthocyanes avec l'augmentation de la contrainte hydrique, ceci pouvant également être mis en relation avec la réduction de la taille des baies.

BILAN II

Cette seconde partie a permis de montrer les conséquences des modifications climatiques provoquées par le réchauffement climatique d'une part sur le cycle phénologique de la vigne et d'autre part sur la maturation des baies. On remarque ainsi un décalage du cycle phénologique de la vigne et une modification de l'accumulation des métabolites au sein des baies. En particulier, l'augmentation des températures est à l'origine d'une augmentation des taux de sucres au sein des baies au détriment de l'acidité.

III. LES LEVIERS D'ACTION A LONG TERME

Il s'agit maintenant de chercher les leviers d'action permettant de s'adapter au réchauffement du climat. En prenant en compte les perspectives d'évolution du climat et ses conséquences, on s'intéresse dans un premier temps aux leviers d'action à long terme. Ces derniers sont à priori les plus impactant pour lutter contre le changement climatique.

III.1 Modification du matériel végétal

La modification du matériel végétal semble être le levier le plus impactant de tous, et ainsi le plus efficace à long terme. Ces modifications peuvent avoir lieu à plusieurs niveaux.

Sélection du porte-greffe

Le porte-greffe est un élément majeur permettant de lutter contre le réchauffement climatique. Il s'agit de choisir un porte-greffe adapté aux conditions climatiques, à l'état hydrique et au sol de la parcelle, mais aussi adapté au cépage planté et à la vigueur de la vigne. Il est préférable, dans le contexte du changement climatique de choisir un porte-greffe induisant un cycle plus long comme le 420A (Van Leeuwen et al. 2016) qui est plus adapté car un cycle plus long induit une maturation des baies décalée, vers la fin de l'été ou même automne, et donc une maturation en climat plus frais. De même pour les porte-greffes résistants à la sécheresse comme le 140 Ruggieri et le 110 Richter (Quénol et al. 2014).

La recherche travaille actuellement sur de nouveaux porte-greffes mieux adaptés aux conditions climatiques actuelles et à venir.

Sélection du cépage

La sélection du cépage est un deuxième facteur déterminant dans l'adaptation des vignobles au réchauffement climatique.

Dans un premier temps, une sélection clonale peut permettre un premier degré d'adaptation. En effet un même cépage présente généralement des clones à cycle plus long ou plus tardif. Il peut y avoir 8 à 10 jours de différence de maturité entre clones (Quénol et al. 2014). D'autre part l'utilisation de la sélection massale peut-être un outil des plus intéressants pour obtenir des clones plus adaptés aux terroirs qui évoluent (Bois, 2014.)

L'exploitation de la variabilité génétique a été utilisée jusqu'ici pour trouver des clones plutôt précoces et producteurs de raisins riches en sucres en lien avec le contexte du moment. Aujourd'hui il faut réexploiter cette variabilité à des fins différentes en relation avec le contexte de réchauffement climatique actuel (Van Leeuwen et al., 2016)

Dans un second temps on peut réfléchir à adapter le cépage en lui-même, en choisissant des cépages naturellement tardifs et peu sensibles à la sécheresse. Ces derniers pourront provenir d'autres régions viticoles de France ou d'autres pays et seront probablement nécessaires à l'adaptation des vignobles au réchauffement climatique sur le long terme.

Des projets de recherche sont déjà lancés actuellement comme le projet VitAdapt à l'ISVV où 52 cépages sont étudiés dans le but d'en introduire certains dans la région bordelaise. (Van Leeuwen et al., 2016)

La modification des cépages cultivés reste cependant une alternative difficile à mettre en place actuellement en Europe et notamment en France. D'une part à cause des appellations et des cahiers des charges dans lesquels les cépages autorisés sont restreints. D'autre part parce que la prise de risque d'un changement de style de vins est trop importante, surtout pour les vins de terroir revendiqués par les différentes régions viticoles notamment européennes.

Chez les vins d'assemblage, une modification des proportions de chaque cépage peut permettre une adaptation plus facile. C'est le cas par exemple dans la région bordelaise où les proportions de Cabernet Franc ou Cabernet Sauvignon, plus tardifs, peuvent prendre le pas sur le Merlot, qui est plus précoce et actuellement majoritaire.

Les vignobles du nouveau monde auront également plus de facilité à adapter leur cépage. En effet ils n'ont pas d'appellations traditionnelles et produisent généralement des vins de cépage et non de terroir.

III.2 Mise en place du vignoble

Irrigation

Pour lutter contre le stress hydrique, l'apport d'eau par irrigation peut apparaître comme une solution. En effet une pluviosité annuelle de moins de 400mm rend difficile la culture de la vigne (C. V. Leeuwen, Trégoat, et Choné 2003), cependant cette valeur dépend d'autres facteurs comme la réserve en eau du sol et la répartition des précipitations.

En pratique, il est conseillé d'utiliser une stratégie déficitaire qui aboutit à une situation de stress modéré et à un bon compromis entre rendement et qualité, tout en limitant les quantités d'eau apportées (Lebon E. et al., 2014).

Cette solution présente cependant un coût économique et environnemental important. De plus elle ne peut pas être mise en place partout selon la législation en vigueur, notamment au niveau des cahiers des charges des appellations.

Hauteur de tronc

La hauteur du tronc induit la hauteur des grappes par rapport au sol. Ainsi, si on conduit la vigne de manière à ce que le tronc soit plus long, les grappes seront plus hautes. Il a été observé que les températures près du sol, et plus encore sur les sols secs caillouteux comme ceux de Châteauneuf-du-Pape, sont bien plus élevées que lorsqu'on s'en éloigne. Les grappes en hauteur seront donc dans un climat plus frais. (Van Leeuwen et Darriet, 2016)

Conduite en Gobelet

La conduite en gobelet est particulièrement adaptée aux régions viticoles les plus chaudes. En effet la surface foliaire de ce système de conduite est assez faible et permet ainsi de limiter les pertes en eau par évapotranspiration (Van Leeuwen et Darriet, 2016). D'autre part les rendements sont généralement assez faible, ce qui permet de garder un rapport feuille/fruit convenable et sans nécessité d'activité photosynthétique trop importante.

Les faibles rendements ne sont pas trop problématiques du fait des faibles coûts de production des gobelets (pas de système de palissage et donc moins de main d'œuvre). Cependant la mécanisation des vignobles en gobelet pour la récolte est impossible. (Van Leeuwen et al. 2016)

Taille tardive

Une taille tardive à la fin du mois de Février ou en Mars permet de décaler la date de débourrement des vignes. Les différents stades succédant le débourrement seront donc eux aussi décalés ce qui permet de lutter contre l'effet de l'augmentation des températures dans le cadre du réchauffement climatique. En effet la maturation des baies pourra se ainsi se faire dans des conditions plus fraîches. (Van Leeuwen et Darriet, 2016)

Ce levier d'action n'est cependant pas toujours facile à mettre en place car il implique de réaliser une taille rapide de toute la surface du domaine. Il ne sera réalisable que sur une partie de la surface chez les domaines viticoles très étendus.

Gestion de l'inter-rang

La gestion de l'inter-rang peut permettre de lutter notamment contre le stress hydrique. En effet, on peut choisir de pratiquer un travail superficiel du sol afin d'éliminer la concurrence et également le flux d'évaporation d'eau. On peut aussi mettre en place un enherbement si l'on cherche à limiter la vigueur des vignes et donc leurs besoins en eau par la suite. Un enherbement peut également améliorer le remplissage de la réserve utile (RU) du sol en hiver et favoriser l'enracinement en profondeur des vignes par compétition (Lebon E. et al., 2014)

III.3 Adaptation de la localisation des vignes

Sur le long terme, on peut penser à une modification de la localisation des vignobles afin de s'adapter au réchauffement du climat.

D'une part, il est possible de s'adapter localement. En effet au sein d'une même région il existe une variété de terroirs différents que ce soit au niveau de la topographie, des sols, des microclimats. Les parcelles peuvent ainsi être choisies plus en altitude, sur des sols plus profonds possédant des réserves utiles plus importante afin que les vignes évoluent dans un climat plus frais et moins sensible au stress hydrique (Quénol et al., 2014).

Une montée en altitude peut permettre par exemple de diminuer la température ambiante de 0,65°C tous les 100m d'élévation. (Van Leeuwen et Darriet, 2016)

D'autre part, une modification de la carte des vignobles du monde est à envisager sur le long terme. Le développement de la culture de la vigne dans des régions ou des pays au climat plus frais, au détriment des régions viticoles au climat devenu trop chaud. Le coût économique et social est cependant très important. L'impact économique sur les régions délaissées serait énorme.

BILAN III

Les leviers d'action étudiés ici sont certainement les plus efficaces pour ce qui est de l'adaptation au changement climatique. Ils sont cependant relativement difficiles à mettre en place et demandent des coûts d'investissement importants.

IV. LES LEVIERS D' ACTIONS A COURT TERME

Actuellement, les vignerons cherchent donc plutôt à mettre en place des leviers d'action à court terme, qui puissent avoir un impact immédiat sur la vigne et le vin et qui ne nécessitent pas de modifications majeures des domaines viticoles et de leur organisation.

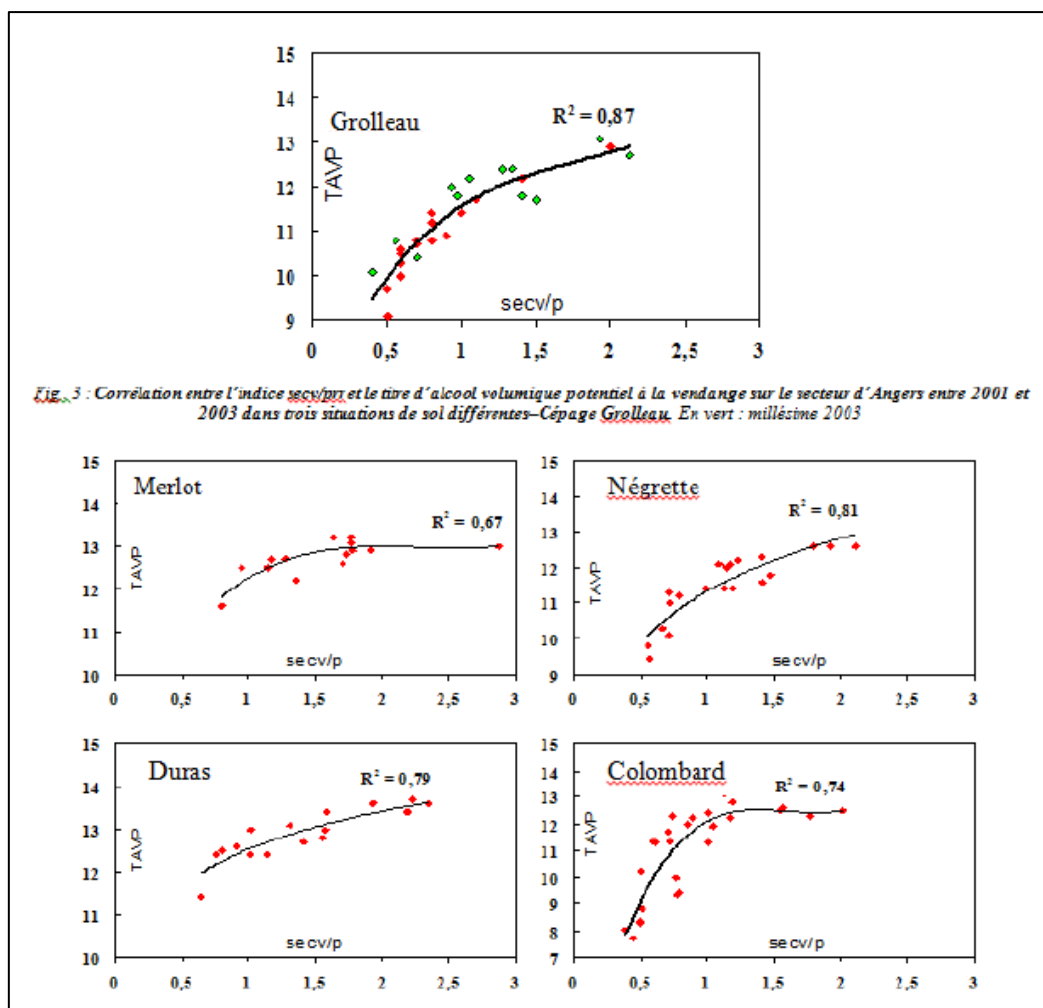


Fig. 3 : Corrélation entre l'indice $se cv/p$ et le titre d'alcool volumique potentiel à la vendange sur le secteur d'Angers entre 2001 et 2003 dans trois situations de sol différentes - Cépage Grolleau. En vert : millésime 2003

Figure 16: Graphiques du taux d'alcool potentiel de mout à la vendange en fonction du rapport feuille/fruit chez cinq cépages

IV.1 Influence des pratiques œnologiques

Après la récolte, à l'arrivée en cave de vinification, le raisin et le vin qui en sera issu peuvent encore être manipulés et corrigés selon leur composition.

Correction de l'alcool

La correction du taux d'alcool peut passer par plusieurs mécanismes. Il peut intervenir dès le début, sur moût, alors que la fermentation n'a pas encore eu lieu, en ensemençant la cuve avec des levures à faible rendement alcoolique par exemple. On peut également utiliser d'autres procédés de diminution de l'alcool tel qu'une désalcoolisation par osmose inverse sur vin fini.

Correction de l'acide

La régulation de l'acidité d'un vin peut se faire par méthode chimique, directement par ajout d'acide tartrique dans le moût. On peut également utiliser une méthode biologique grâce à des levures sélectionnées telles que les levures lonyes du fabricant Lallemant qui ont un fort pouvoir acidifiant. Enfin il est possible d'utiliser la méthode physique de l'électrodialyse toujours dans le but d'augmenter l'acidité d'un vin.

IV.2 Modification du rapport feuille/fruit

Afin de lutter contre le réchauffement climatique, l'idée de retarder les stades phénologiques qui sont actuellement avancés par le phénomène d'augmentation des températures peut être une solution. Pour cela, il est possible d'agir sur le rapport feuille/fruit qui est caractérisé par la relation source/puit. La priorité va aux organes végétatifs lors de la période de croissance puis aux raisins lors de la maturation, selon la vigueur de la vigne (Dufourcq, s. d.) D'après François M. MURISIER il faut 1 à 1,2m² de surface foliaire pour faire murir 1kg de raisin (MURISIER 1996)

On peut observer (Figure 16) que l'augmentation du rapport SECV/pr est significativement corrélée avec une augmentation du TAV. (Dufourcq, s.d.)

En effet une diminution de ce ratio retarde la véraison et ainsi les stades successifs. Ceci aboutit à une teneur en sucre moins élevée mais est souvent à l'origine d'une altération de la qualité des raisins, notamment un taux de polyphénols moins élevé et des arômes végétaux (Van Leeuwen et Darriet 2016).

Attention également à la contrainte hydrique car si celle-ci est trop élevée elle peut prendre le pas sur l'influence du ratio. C'est l'effet millésime qui prime donc dans ce cas.

Afin d'influencer le rapport feuille/fruit, les techniques suivantes sont envisageables.

- On peut penser à une augmentation du rendement, en passant par la taille, pour réduire le ratio SECV/pr. Cependant, en pratique on observe que même une augmentation importante du rendement (+66%) n'affecte pas le taux de Taux de solides solubles (TSS) final. (Alberto Palliotti et al., 2014)
- Un effeuillage peut être envisagé toujours dans le but de diminuer le ratio SECV/pr. D'après la publication de Alberto PALLIOTTI (Palliotti et al. 2014), un effeuillage tardif de 30-35% après véraison serait efficace pour limiter le taux de sucres et le TAV final. Il s'agit en particulier d'enlever les feuilles apicales à la zone des grappes car ce sont les plus actives à cette période (ce sont les plus grandes et loin de la senescence). Cette pratique entraîne un décalage de la maturité de 2 semaines et diminue de 1,2 Brix le moût (-0,6% vol dans le vin).

- On peut également choisir la pratique du rognage des vignes pour diminuer la surface foliaire et ainsi le SECV/pr. Cette méthode donne de bons résultats sur la diminution des taux de TSS. Elle favorise notamment la pousse des entre-cœurs qui entrent en compétition avec les baies pour la répartition des photosynthétats. Ces dernières subissent ainsi une maturation plus lente, avec moins d'apport en sucres. Le rognage peut avoir un impact très différent selon le moment où on le pratique. Cependant un rognage sévère a généralement pour effet de retarder la maturation des baies quelque soit la période. Lorsqu'il est effectué tôt, le rendement est très souvent impacté alors qu'un rognage plus tardif entraîne une réduction de la surface foliaire. D'après F Martínez DE TODA un rognage sévère une semaine après nouaison (baies de 3-4mm) serait optimal afin d'affecter au maximum le développement des baies et leur maturation (Toda et al., s. d.). En termes de ratio feuilles/fruits, il est recommandé de passer en dessous de 0,75m²/kg afin d'espacer la floraison et la véraison et ainsi d'impacter efficacement les dates de maturité (Quénol et al. 2014).

IV.3 Modification de l'interception lumineuse

Une autre méthode pour lutter contre le réchauffement climatique par le biais des pratiques culturales est de diminuer l'interception lumineuse des feuilles. Il en résulte une diminution de l'activité photosynthétique et ainsi une maturation plus lente. De plus il y a diminution de la température ce qui permet de diminuer l'évapotranspiration des feuilles et donc de limiter les pertes en eau.

Les deux pratiques suivantes ont été retenues pour diminuer l'interception lumineuse.

Pose de filets d'ombrages

La pose de filets d'ombrages a pour effet immédiat de diminuer l'interception du rayonnement solaire par les feuilles. Ils entraînent également une réduction importante de la température des feuilles et/ou des fruits selon leur disposition.

Ainsi dans l'expérimentation réalisée par Gustavo A. LOBOS (Lobos et al. 2015), il est démontré que la pose de filets d'ombrages entraîne une différence significative de réflectance des UV, une température des baies plus faible (-3,8°C) et un stress hydrique limité.

Les résultats quant à l'impact des filets sur la composition des baies sont variés. Dans l'expérimentation citée précédemment aucune différence significative n'a été observé. En revanche, l'article de Alberto PALLIOTTI (Palliotti et al. 2014) fait appel à trois publications dans lesquelles des différences ont été montrées, notamment un taux de sucres et d'anthocyanes plus faible.

Pulvérisation d'argile sur feuille

L'utilisation de kaolin, une argile blanche qui forme une fine couche en surface des feuilles et des fruits permet tout comme la pose de filets d'augmenter la réflectance et ainsi de diminuer l'activité photosynthétique. Elle permet aussi de diminuer la température des parties recouvertes. Ces argiles sont utilisées la plupart du temps contre les maladies et ravageurs chez l'olivier et le pommier. (CF kaolin et filet, LOBOS).

L'expérimentation de Gustavo A. LOBOS met en évidence une différence significative de réflectance (UV et PAR) ainsi que de températures des fruits. De même que pour la pose de filets, la pulvérisation d'argile décale la maturité.

D'autre part l'argile sur grappes permet de diminuer les risques de dommages liés au soleil et aux fortes chaleurs.



Figure 17: Vue satellite de la parcelle choisie et surface correspondante (mesure : geoportail)

En termes de composition, l'auteur Claudio DI VAIO met en évidence une diminution des taux de sucres dans les baies et l'aboutissement à des vins à plus faible taux d'alcool. (Di Vaio et al. 2019)

Cependant l'effet de l'argile doit être raisonné en fonction de l'état hydrique des vignes. En effet Teerapat TEPKAEWA (Teerapat et al. 2014) montre dans sa publication que l'effet de l'argile peut être modulé en cas de déficit hydrique important et ne pas avoir l'effet escompté.

BILAN IV

En somme, afin de réduire les effets du réchauffement climatique à court terme, des solutions existent en viticulture comme en œnologie. Il est ainsi possible de jouer sur la relation sources/puits ou encore sur l'interception lumineuse durant la saison culturale. On peut également agir sur moût ou sur vin pour corriger les éventuels déséquilibres.

PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODE

Après avoir étudié le réchauffement climatique, ses conséquences et les différentes solutions envisageables pour s'y adapter, nous poursuivons par la mise en place d'une expérimentation au Château de Beaucastel dans le but de répondre à la problématique. Dans le cadre de cette étude, ce sont les leviers d'action à court terme en viticulture qui nous ont intéressés.

I. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

I.1 La parcelle d'étude

Choix de la parcelle :

Parmi les 100ha de surface cultivée en vigne du domaine, il a fallu identifier la parcelle la plus adéquate pour cet essai.

Le choix de la parcelle s'est fait dans un premier temps sur le facteur cépage car les problèmes de degrés élevés rencontrés se posent le plus souvent sur le Grenache. Il a ainsi été naturel de choisir une parcelle de ce cépage. Le domaine présentant un grand nombre de parcelle de Grenache, nous avons affiné notre recherche par le choix d'une parcelle conduite en cordon palissé car même si cette conduite ne concerne pas une grande partie du domaine elle permettait une plus grande facilité des étapes de mesures.

Nous avons ainsi choisit la parcelle « Grenache Pont », situé sur l'appellation Côtes-du-rhône (Figure 17). Les caractéristiques de la parcelle sont résumées dans le Tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Tableau des caractéristiques de la parcelle choisie

CARACTERISTIQUES DE LA PARCELLE	
Cépage	Grenache
Porte-greffe	110R
Age des vignes	5 ans (pas de replantation ni de complantation)
Surface	2,5 ha
Système de conduite	Cordon de Royat bilatéral, taillé à 6 coursons portant chacun 2 yeux
Densité de plantation	2m x 2m
Orientation	NE-SO
Type de sol	Argilo-calcaire (argile rouge majoritaire) avec un taux d'éléments grossiers important (galets roulés)

Homogénéité de la parcelle :

Il est important de prêter une grande attention à l'homogénéité de la parcelle, que ce soit l'homogénéité des sols (nature, profondeur, pente) ou l'homogénéité des pieds de vigne (porte-greffe, âge, vigueur).

En termes de sol, la parcelle est bien homogène.

En ce qui concerne les vignes, elles sont de même âge et plantées sur le même porte-greffe. Quelques hétérogénéités de vigueur sont observables notamment du côté ouest ainsi qu'un certain nombre de manquants. L'expérimentation ne nécessitant pas une surface aussi importante, la partie ouest de la parcelle ne sera pas utilisée.

L'homogénéité de la partie utilisée pour l'essai est vérifiée par mesure du nombre de rameaux s'étant développés par pied et par mesure de leur longueur. On obtient ainsi une bonne estimation de la vigueur des plants.

La Figure 18 montre les moyennes obtenues pour chaque bloc concernant le nombre de rameaux par pied et leur longueur.

Une ANOVA a été réalisée sur le nombre de rameaux par pied et n'a montré aucune différence significative entre les trois blocs ($p\text{-value} > 0,05$). Pour ce qui est de la longueur des rameaux, l'hypothèse de normalité n'étant pas validée par le test de Shapiro, le test de Kruskal-Wallis a été utilisé. Ce dernier n'a montré aucune différence significative entre les blocs ($p\text{-value} > 0,05$). On peut donc conclure que les vigueurs des pieds de vignes sont homogènes sur les trois blocs.

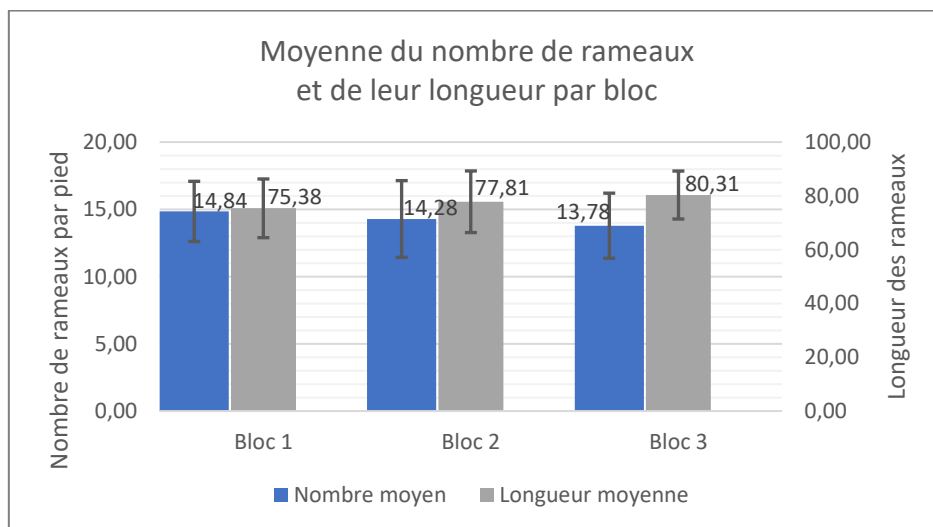


Figure 18: Histogramme du nombre moyen de rameaux par pied de vigne et de leur longueur

I.2 Disposition de l'expérimentation :

Cinq modalités ont été retenues pour cette expérimentation : Témoin (T), Rognage (R), Filets d'ombrage (F) ainsi que deux modalités de pose d'argile correspondant à deux concentrations différentes (A1 et A2). Ces modalités sont décrites dans la partie suivante (II. MODALITES ETUDIEES).

Trois répétitions de chaque modalité sont mises en place pour une bonne exploitation des résultats ce qui forme trois blocs sur la parcelle. Chaque bloc contient cinq parcelles élémentaires de 15 pieds de long sur 4 rangs soit 60 pieds correspondant à chacune des modalités. (Annexe 3 : schéma du dispositif expérimental).

II. MODALITES ETUDIEES

Des photos de la mise en place des différentes modalités sont disponible en Annexe 4.

II.1 Diminution du rapport feuille/fruit par Rognage

Comme expliqué précédemment, une diminution du rapport feuille/fruit par rognage des rameaux entraîne un décalage du cycle de la vigne permettant aux baies de murir plus tard dans la saison, dans des conditions moins chaudes, et ainsi de limiter l'accumulation rapide des sucres dans les baies.

Un rognage sévère des rameaux est ainsi réalisé le 21 Juin 2019 au stade de la mise à fruit. Il s'agit d'un rognage à 50% des rameaux réalisé manuellement à l'aide de cisailles sur les 3 blocs de rognage.

Cette opération de rognage peut entraîner un développement des entre-cœurs des vignes assez important. Cependant, ce phénomène est resté assez limité dans la parcelle étudiée, ce qui est probablement lié à la sécheresse dont a fait preuve ce millésime. Ainsi, bien que les entre-cœurs se soient un peu développés, il n'a pas été nécessaire de réaliser un deuxième passage afin de les éliminer.

II.2 Argile

La pose d'argile sur feuille permet d'une part une diminution de l'activité photosynthétique et d'autre part une limitation de l'évapotranspiration par diminution de la température des feuilles.

Type d'argile :

En pratique, l'argile utilisée était de l'argile blanche en poudre de type Kaolinite, également utilisée pour les cultures d'oliviers du domaine.

Choix des doses :

Les doses nécessaires à une bonne efficacité de cette modalité n'étant pas bien connues, nous avons mis en place deux modalités « Argile » en utilisant deux doses différentes :

- 20 kg/ha soit 2kg/100l
- 60 kg/ha soit 6kg/100l

Ces doses ont été choisies en nous basant sur la bibliographie et en choisissant deux doses bien différentes pour mieux évaluer l'impact sur la vigne et les baies de la couche d'argile.

Pose de l'argile :

La pose de l'argile se fait par un pulvérisateur à jet porté avec ventilateur à flux axial qui présente une cuve d'une capacité de 400L. Le pulvérisateur sur tracteur est ici préféré au pulvérisateur à dos pour des questions d'homogénéité de la couche d'argile sur feuille. Le dessus et le dessous des feuilles sont ainsi pulvérisés de la même manière sur tous les pieds de vigne.

Ce pulvérisateur permet de couvrir deux faces lors de son passage et plusieurs allers-retours sont ainsi nécessaires pour chaque bloc.

En ce qui concerne le remplissage de la cuve, l'argile est tout d'abord dissous dans un bac d'eau puis est versé dans la cuve. On complète ensuite la cuve avec de l'eau pour atteindre 100L de solution.

La première pose d'argile a été réalisée le 24 Juillet 2019, juste avant véraison, sur les trois blocs « argile ». L'objectif est d'agir sur la photosynthèse et l'état hydrique de la plante pendant la maturation des baies et ainsi de ralentir l'accumulation en sucres.

Un deuxième passage a été réalisé le 23 Aout 2019 afin de maintenir une bonne couverture des feuilles car l'argile commençait alors à s'estomper.

II.3 Filets d'ombrage

De même que la pose d'argile sur feuille, la mise en place de filets d'ombrage entraîne une diminution de l'activité photosynthétique et une limitation de l'évapotranspiration par diminution de la température des feuilles.

Choix des filets :

Le type de filets choisis dépend notamment du taux d'ombrage que l'on cherche à imposer à la vigne. Un taux de 50% a ici été choisi. Il s'agit d'un taux moyen utilisé dans la bibliographie, en effet il permet d'avoir une bonne idée de l'impact des filets d'ombrages sur la vigne sans trop prendre de risque quant à l'activité photosynthétique nécessaire à celle-ci.

Mise en place des filets :

La parcelle étant orientée nord-est / sud-ouest, il a été décidé de placer les filets d'ombrage sur les deux faces de la vigne. De plus, afin que celle-ci puisse poursuivre son développement sans obstacles, la pose des filets est réalisée sur chaque face de manière indépendante.

Les filets commandés étaient de dimension 1m x 100m. Quatre rouleaux sont ainsi commandés et découpés en tronçons de 15m de long.

La mise en place a lieu le 1^{er} Aout. Elle se fait face par face grâce à des connecteurs qui permettent de fixer le filet au fil de palissage. Les filets des deux faces sont ensuite agrafés ensemble afin de passer au-dessus de la végétation sans abimer les rameaux.

III. MESURES EFFECTUEES

III.1 Analyse de l'état hydrique

Mesure des températures de feuilles par laser :

La température des feuilles a été mesurée le 23 Août en début d'après-midi par laser infrarouge.

Pour chaque bloc, 4 mesures par rang par modalité ont été réalisées soit 16 mesures par modalité par bloc et 48 mesures par modalité en tout.

Les feuilles choisies étaient sur des rameaux principaux, environ de même taille et exposées à la lumière.

Mesure du potentiel hydrique foliaire de tige (PHFT)

L'état hydrique des vignes de l'expérimentation a été évalué à l'aide d'une chambre à pression de Scholander

Une mesure du potentiel hydrique de tige a été effectuée, donnant une estimation fiable du statut hydrique des plantes et de la disponibilité en eau du sol.

La mesure a été réalisée le 22 Août. Elle a concerné 2 feuilles par modalité par bloc ce qui équivaut à 6 mesures par modalité et 30 mesures en tout.

Les 30 feuilles ont ainsi été ensachées entre 10h et 11h dans un sachet plastique et une feuille d'aluminium afin que la transpiration s'arrête et que le potentiel hydrique de la feuille s'équilibre avec celui de la plante.

Les mesures ont commencé à 12h30, plus de 2h après la pose des premiers sachets.

Chaque feuille est prélevée juste avant que la mesure soit effectuée sur celle-ci, puis elle est placée dans la chambre et mise progressivement sous pression jusqu'à ce que de l'humidité apparaisse sur le pétiole.

III.2 Suivi du développement végétatif

Mesure de la Surface Externe de Couvert Végétal (SECV) :

La mesure de la végétation s'est faite le 31 Juillet à l'aide d'un mètre.

La hauteur et l'épaisseur de végétation de 2 pieds par rang par modalité et par bloc ont été mesurés. 8 mesures par modalité par bloc ont ainsi été récoltées soit 24 mesures par modalité en tout.

Ces mesures ont permis de calculer par la suite la SECV, qui donne la surface active pour la photosynthèse :

$$\text{SECV} = \frac{2H+W}{E}$$

- H : hauteur de végétation (m)
- W : épaisseur de végétation (m)
- E : distance entre deux rangs (m)

La SECV permet de calculer le rapport feuille/fruit via l'indice SECV/pr avec pr le poids de récolte.

Suivi du développement rameaux llaire

Les pieds de vignes utilisés pour mesurer la SECV ont également permis d'évaluer le développement des entre-cœurs pour chaque modalité.

Le nombre et la longueur des entre-cœurs ont été relevés à 3 dates différentes au cours de la saison.

III.3 Suivi de la maturité des baies

Des prélèvements de grappes ont été réalisés à six reprises dans la parcelle d'expérimentation afin de suivre l'évolution des métabolites au sein des baies pour chaque modalité.

Le nombre d'analyses possibles étant limité notamment à cause du temps, les analyses ont été réalisées sur les trois blocs en même temps et non pas chaque bloc séparément.

L'échantillonnage est réalisé selon les méthodes du domaine pour des raisons pratiques. Il aurait cependant été intéressant de réaliser une étude bibliographique à ce sujet afin d'identifier une méthode permettant plus de précision.

Les prélèvements sont réalisés de la manière suivante : pour chaque modalité 10 grappes de chaque bloc sont récoltées afin d'obtenir 30 grappes par modalité provenant des 3 blocs. Ces grappes sont ensuite écrasées manuellement et le mout qui en est issu est envoyé au laboratoire pour analyse.

Le laboratoire donne les analyses suivantes :

Degré probable (%Vol) – Glucose/Fructose irtf (g/l) – Acidité Totale irtf (gH₂SHO₄/l) – pH irtf – Acide Malique irtf (g/l) – Acide Tartrique irtf (g/l) – N assimilable irtf (mg/l) – K irtf (mg/l) – Indice maturité

III.4 Récolte

Date de récolte

L'organisation de la récolte des essais a été un point difficile.

Idéalement, la récolte aurait pu se faire modalité par modalité à un TAP choisi, les 3 répétitions en même temps. Ceci aurait pu permettre une bonne comparaison des différentes modalités au travers des vins produits et la présence de répétitions pour évaluer la fiabilité des résultats. Cependant il aurait ainsi fallu tout d'abord réaliser des analyses sur chaque modalité de chaque bloc, c'est-à-dire 15 analyses afin de récolter chacune au même TAP. Il aurait de plus fallu réaliser potentiellement 15 passages de vendange différents toujours dans le but de récolter au même TAP. Enfin les résultats d'analyses de maturité sur grappes des différentes modalités n'étaient pas toujours cohérents d'une date à une autre et remettait ainsi en cause leur fiabilité.

En pratique, il a été choisi de vendanger les modalités à deux dates différentes et de les comparer à ces deux dates en termes de maturité et de qualité organoleptique. Le choix de deux dates permettait aux modalités à maturités plus tardives d'avoir le temps de murir.

Il n'était cependant pas possible de récolter la moitié des blocs à une date et l'autre moitié à l'autre date car cela aurait multiplié le nombre de cuves (5 cuves par bloc par date donc 15 cuves par date soit 30 cuves au total). De plus la quantité de raisin n'aurait pas été suffisante. Dans ces conditions, le bloc 3 a donc été vendangé à une première date (14/09) et les blocs 1 et 2 à une seconde date (24/9).

Mesure de rendement à la récolte

A la récolte, des mesures de rendements ont été effectuées.

D'une part le nombre de grappes par pieds a été compté sur 20 pieds par modalité pour chaque bloc. Ces mesures sont réalisées sur deux séries de 10 pieds successifs pour chaque modalité pour une question d'objectivité de la personne qui compte.

D'autre part, la masse de 20 grappes par modalité par bloc a été mesurée, à l'aide d'une balance, les grappes étant coupées au hasard au sein de chaque unité d'expérimentation.

Ces deux mesures permettent ainsi de calculer un rendement par pied et par la suite un rendement par modalité.

Microvinification et dégustation des vins

Lors des vendanges de l'expérimentation, les grappes sont placées entières dans des cuves en inox de 1hL pour chaque modalité. Chaque cuve est sulfitée à 3g/hl. En considérant la masse de raisins placée dans la cuve, on estime à 30L le volume de mout. Le sulfitage a donc été de 10ml par cuve.

Une première analyse du moût de chaque modalité est demandée le lendemain de l'arrivée des raisins. Par la suite la densité et la température de chaque cuve sont relevées tous les jours afin de suivre l'évolution de la fermentation.

Pour un souci d'homogénéité, les cuves ont étéensemencées par 200ml de moût en fermentation, provenant d'une cuve de la cave, trois jours après leur récolte.

Les cuves sont pigées tous les jours pendant leur fermentation et jusqu'à leur décuvage.

Les analyses de fin de fermentation permettront une identification de l'effet des modalités sur le degré alcoolique du vin.

Pour ce qui est des qualités organoleptiques de celui-ci, une dégustation sera organisée afin de comparer la qualité du vin issu de chaque modalité.

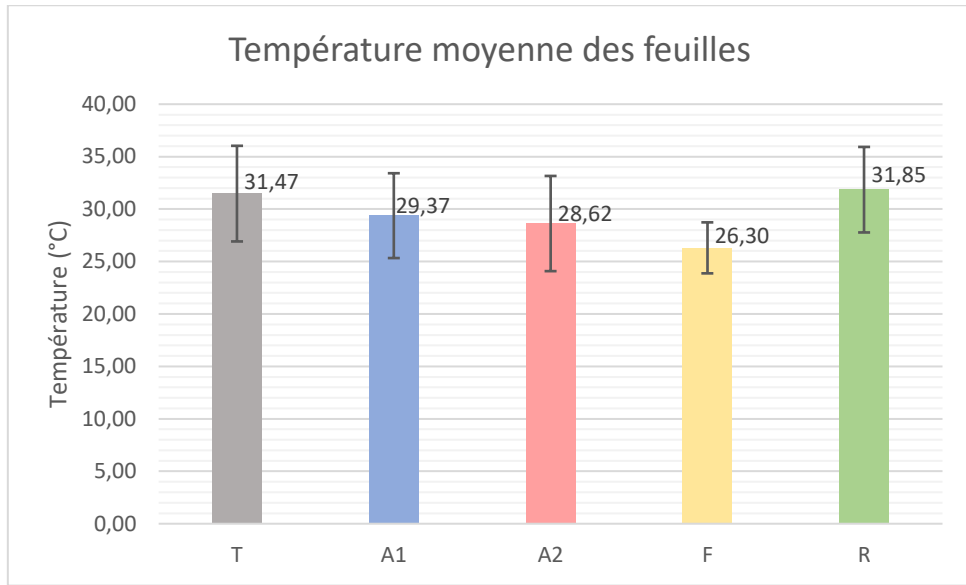


Figure 19: Histogramme de la température moyenne des feuilles relevée pour chaque modalité ainsi que leur écart-type correspondant

PARTIE 3 – RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, on pourra se référer à l'Annexe 7 qui montre les boxplots renvoyé par R lors des études statistique.

I. LE MILLESIME 2019

Le millésime 2019 à Châteauneuf-du-pape a été une année chaude et sèche. Les températures ont été particulièrement élevées au cours de la saison, avec des pics à 45°C pendant la canicule fin Juin et également en Août. Des précipitations ont eu lieu au tout début de la saison en Avril-Mai, ce qui a été bénéfique pour le développement végétatif des vignes. Puis celles-ci ont été très faibles les mois de Juin, Juillet et Août (Annexe 5). Le manque d'eau s'est ainsi fait ressentir chez les plantes qui ont subi un stress hydrique visible, les feuilles et les fruits de certains pieds ayant « grillés » sur pied.

En ce qui concerne la pression cryptogamique, celle-ci a été faible tout au long de la saison. Les traitements au printemps ont permis d'éviter tout départ de maladies et la sécheresse qui a suivi n'a pas permis à ces dernières de se développer.

A la vendange, les raisins étaient ainsi très sains. Les rendements de l'année ont été satisfaisants et la qualité des baies était bonne, même si les TAP sont assez élevés.

II. ETAT HYDRIQUE DES VIGNES

L'état hydrique des vignes est un facteur essentiel dans la région de Châteauneuf-du-pape et particulièrement en cette année chaude et sèche. Il est intéressant d'observer l'impact que peuvent avoir les modalités choisies sur le statut hydrique des vignes, notamment celui des filets d'ombrages et de l'argile qui seraient susceptibles de diminuer l'éventuel déficit hydrique des plantes notamment par le biais d'une diminution de l'évapotranspiration.

II.1 Mesure des températures de feuilles

La mesure des températures des feuilles permet une première approche de l'état physiologique des plantes. Ce facteur peut d'une part renseigner sur l'activité photosynthétique des plantes, celle-ci étant très dépendante de la température. En effet une température comprise entre 25°C et 30°C est optimale pour l'activité photosynthétique mais une température trop élevée, au-dessus de 35°C, entraîne une diminution de celle-ci et une fermeture des stomates ce qui limite l'évapotranspiration. (Jackson, 2008)

Il est ainsi intéressant d'observer les différences de températures des feuilles entre différentes modalités.

Des statistiques ont été réalisées sur les séries de valeur relevées afin de mieux appréhender les différences observées. L'hypothèse de normalité ayant été refusée par le test de Shapiro, une ANOVA n'a pas été réalisable. Le test de Kruskal-Wallis a donc été utilisé et celui-ci a permis de mettre en évidence une différence significative entre les cinq modalités (p -value=1,148 e-10). Des comparaisons multiples ont par la suite permis d'identifier la nature des différences (Tableau 3)

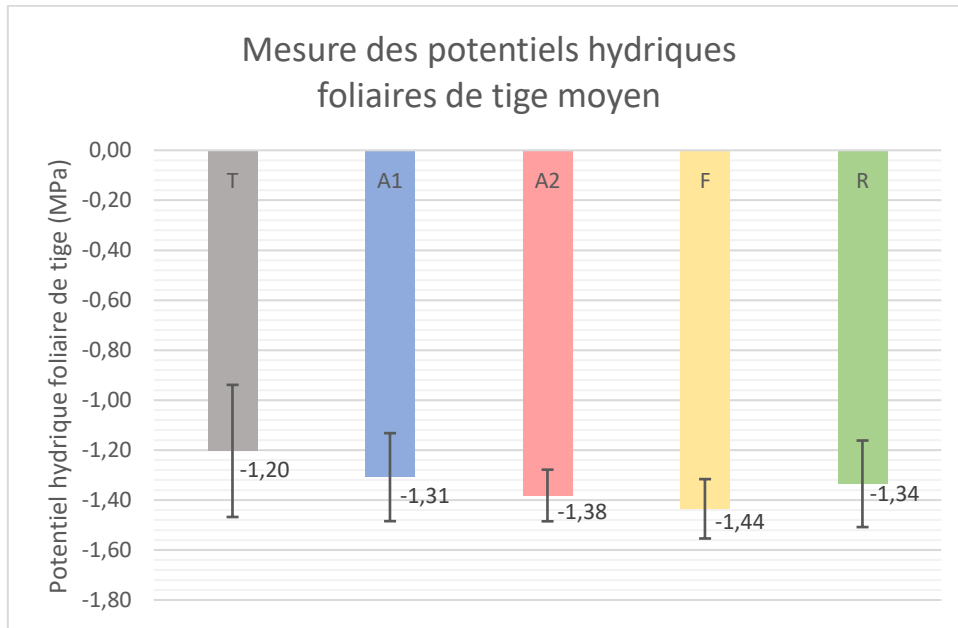


Figure 20 : Histogramme des potentiels hydriques foliaires de tiges moyen de chaque modalité avec les écart-types correspondants

Tableau 3 : Tableau de valeur des p-value pour les PHFT à l'issu de comparaisons multiples par le test de Wilcoxon

	A1 (bc)	A2 (ab)	F (a)	R (d)
A2 (ab)	0,57975	-	-	-
F (a)	0,00308	0,15375	-	-
R (d)	0,01617	0,00063	4,1 e-9	-
T (cd)	0,07327	0,00526	1,1 e-7	0,57975

On peut ainsi conclure que les températures moyennes des différentes modalités sont significativement différentes. On remarque notamment que les modalités Filets ainsi que Argile 2 entraînent des températures de feuilles significativement plus faibles que celles des modalités Témoin et Rognage qui ne présentent pas de dispositif diminuant l'exposition des feuilles. Ceci est cohérent avec la bibliographie. La modalité Argile 1 semble avoir un effet moins important, probablement du fait de sa plus faible épaisseur de couverture. Aucune différence significative n'a ainsi été mise en évidence entre cette modalité et le Témoin.

II.2 Mesure du potentiel hydrique foliaire de tige (PHFT)

La mesure du potentiel hydrique foliaire de tige s'est faite le 22 Aout, par journée ensoleillée. On peut voir sur la Figure 20 les moyennes obtenues pour chaque modalité ainsi que leur écart-types. Par ailleurs, le Tableau 4 : Equivalence entre potentiel hydrique et taux de contrainte hydrique donne les équivalences entre potentiel hydrique foliaire et taux de stress hydrique.

On observe ainsi que toutes les modalités présentent un potentiel hydrique moyen très faible, correspondant à une contrainte hydrique modérée à sévère.

Une ANOVA a été réalisée et n'a montrée aucune différence significative entre les moyennes des cinq modalités ($p\text{-value}=0,3306$).

On peut ainsi conclure que les pratiques de rognage comme de pose de filets ou de pulvérisation d'argile n'ont pas impacté le potentiel hydrique foliaire des vignes, dans les conditions de l'expérimentation. Il aurait été préférable de réaliser un suivi des potentiels hydriques des plantes. D'une part pour avoir une meilleure idée de la contrainte hydrique subit au cours de la saison. D'autre part car l'impact des différentes modalités est susceptible de varier en fonction du taux de déficit hydrique et également de la période de développement de la vigne.

Tableau 4 : Equivalence entre potentiel hydrique et taux de contrainte hydrique (Mesure du potentiel hydrique foliaire, IFVV)

Potentiel Hydrique Foliaire (MPa)	Taux de contrainte hydrique
$-0,6 < \text{PHF} < 0$	Absence de contrainte
$-0,9 < \text{PHF} < -0,6$	Contrainte faible
$-1,1 < \text{PHF} < -0,9$	Contrainte faible à modérée
$-1,4 < \text{PHF} < -1,1$	Contrainte modérée à sévère
$\text{PHF} < -1,4$	Contrainte sévère

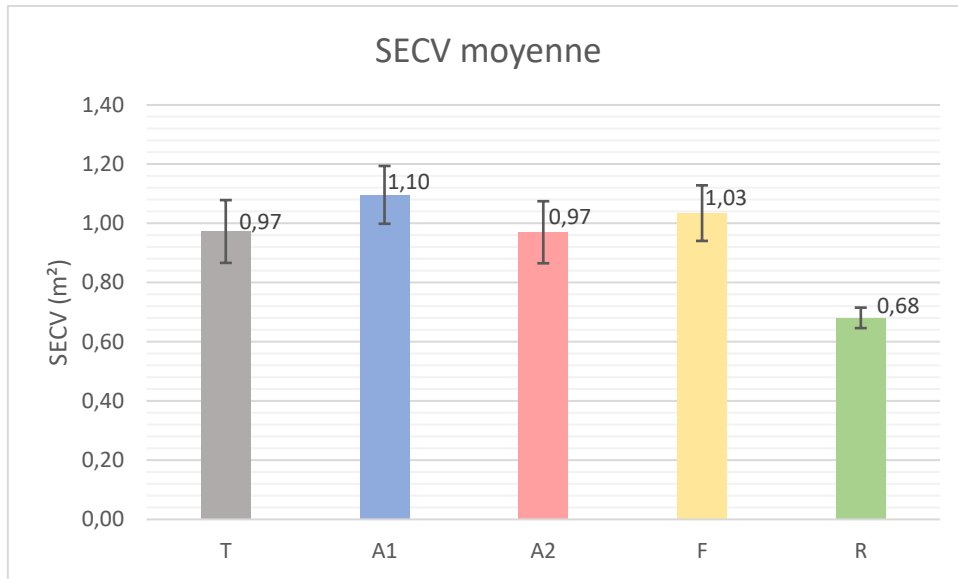


Figure 21 : Histogramme des SECV moyennes de chaque modalité avec les écart-types correspondants

BILAN II.

Pour conclure sur l'état hydrique des vignes de cet essai, celles-ci ont été soumises durant la saison à un stress hydrique important quelle que soit la modalité. La diminution des températures des feuilles chez les modalités Filets et Argile 2 n'aboutit donc pas à une diminution du stress hydrique des plantes. Les mesures de potentiel hydrique mettent même en évidence une tendance plutôt inverse pour ces deux modalités. On pourrait émettre l'hypothèse qu'au vu du stress hydrique important chez cette parcelle et des températures élevées, l'activité photosynthétique est ralentie naturellement. La diminution de la température des feuilles entraînée par les modalités Filets et Argile 2 provoque donc peut-être une réouverture des stomates et une augmentation de l'activité photosynthétique par rapport aux autres modalités, ceci entraînant une augmentation de l'évapotranspiration et ainsi du stress hydrique.

III. LE DEVELOPPEMENT VEGETATIF

Après avoir étudié l'impact des modalités mises en place sur l'état hydrique des vignes, nous nous intéressons à leur influence sur le développement végétatif. Les éventuelles différences de surface foliaire, de développement des rameaux secondaires ou de rendement à la récolte sont une première réponse de la plante aux modalités mises en place.

III.1 – La surface foliaire

La surface externe de couvert végétal (SECV) permet d'identifier la surface de feuillage active pour la photosynthèse.

Les résultats de la Figure 21 montrent une surface foliaire assez faible mais suffisante selon François MURISIER, c'est-à-dire comprise entre 1 et 1,2m², pour les modalités Filets, Argile 1, Argile 2 et pour le Témoin. La modalité Rognage présente une SECV bien différente des autres. En effet l'objectif même de ce rognage est de limiter la SECV. La moyenne de 0,68m² semble satisfaisante, la bibliographie conseillant de se trouver entre 0,5 et 0,75m² afin de retarder efficacement les stades phénologiques sans trop contraindre la plante (Quénol et al. 2014)

Pour ce qui est de la significativité des différences entre modalités, le test de Kruskal-Wallis a été utilisé en l'absence d'homogénéité des variances (test de Bartlett). Ce test a montré une différence significative entre les moyennes (p -value=3,202 e-14). Des comparaisons multiples à l'aide du test de Wilcoxon ont permis d'identifier quelles étaient les différences significatives entre modalités (Tableau 5)

Ainsi la modalité Rognage présente une SECV significativement différente de celle de toutes les autres modalités, ce qui est en accord avec l'objectif de cette pratique dans l'expérimentation. La modalité A1 semble également se démarquer, celle-ci ayant une SECV significativement plus importante que celle de A2 et du Témoin, sans que cela puisse s'expliquer.

Tableau 5 : Tableau de valeur des p -value pour la SECV à l'issue de comparaisons multiples par le test de Wilcoxon réalisé sur R

	A1 (a)	A2(b)	F(ab)	R (c)
A2	0,0014	-	-	-
F	0,1982	0,1982	-	-
R	2,9 e-8	2,9 ^e -8	2,9 e-8	-
T (b)	0,0014	0,1982	0,1982	2,9 e-8

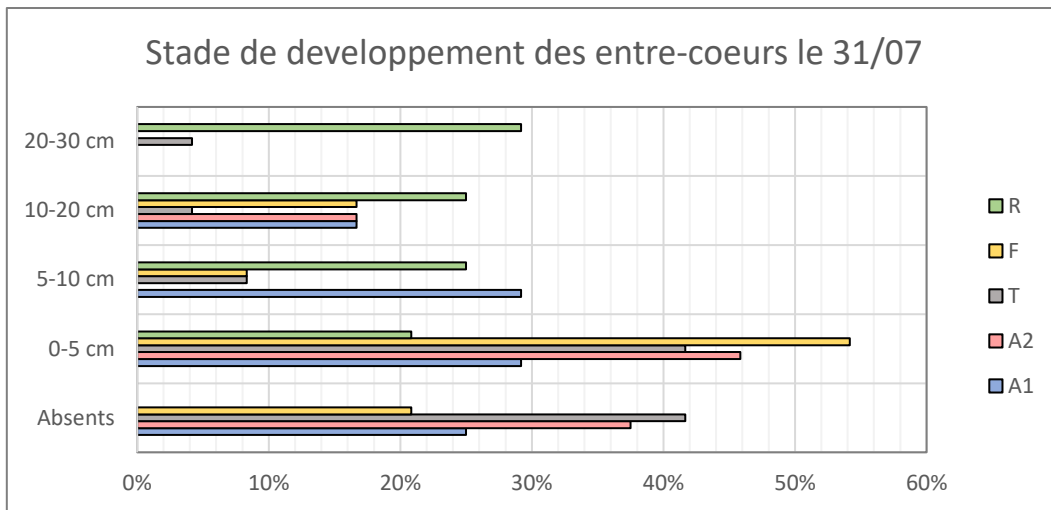


Figure 22: Diagramme de répartition des entre-coeurs par classe de longueur pour chaque modalité le 31 Juillet

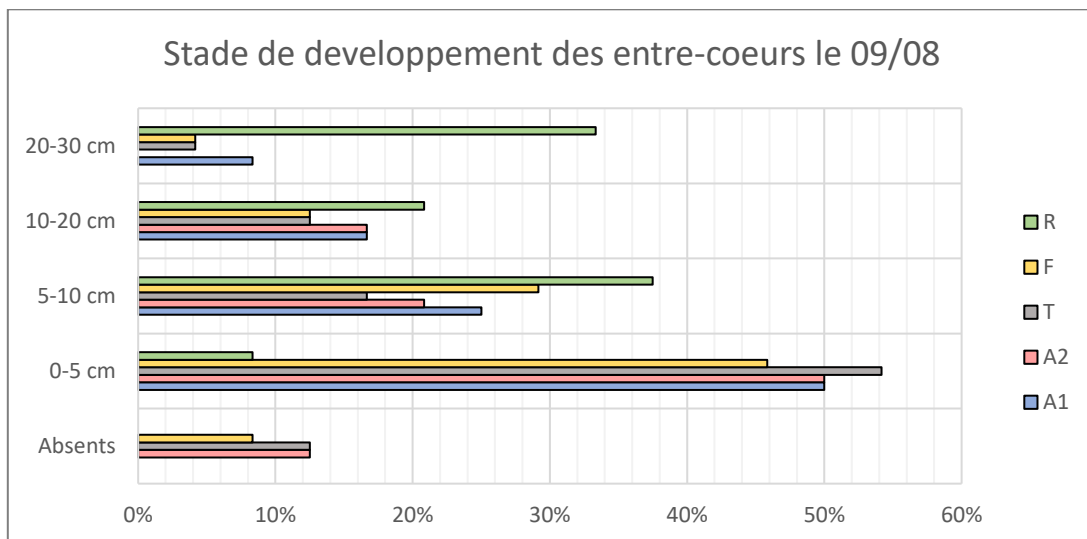


Figure 23: Diagramme de répartition des entre-coeurs par classe de longueur pour chaque modalité le 9 Août

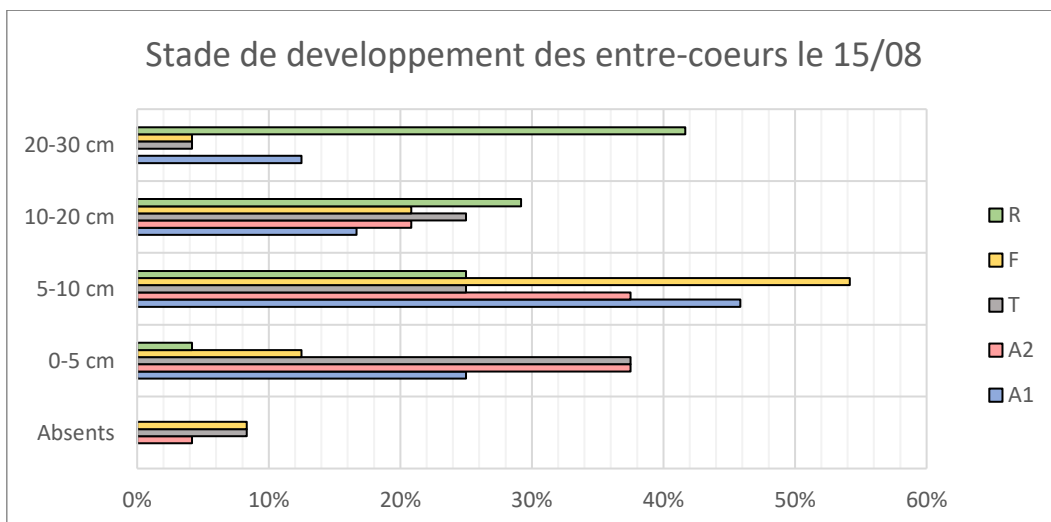


Figure 24: Diagramme de répartition des entre-coeurs par classe de longueur pour chaque modalité le 15 Août

III.2 – Suivi du développement des entre-cœurs

Afin d'identifier les conséquences des différentes modalités sur la plante, il est intéressant d'évaluer l'impact de celles-ci sur le développement des rameaux secondaires ou entre-cœurs. Les figures ... permettent d'observer l'évolution de la proportion d'entre-cœurs par classe de taille pour chaque modalité entre le 31 Juillet et le 15 Août, c'est-à-dire à la fin de la période de croissance végétative.

Il est à noter que les filets n'avaient pas encore été posés lors de la première mesure le 31 Juillet et que l'argile avait été pulvérisée seulement une semaine auparavant, contrairement au Rognage qui avait été réalisé plus d'un mois avant cette mesure. Toutes les modalités étaient en place lors des secondes et troisièmes séries de mesures. Cependant il reste difficile de pouvoir analyser pertinemment l'effet des filets et de l'argile ou de les comparer à la modalité Rognage car ceux-ci étaient en place depuis peu.

Sur ces diagrammes on peut observer que dès la fin du mois de Juillet (Figure 22) les entre-cœurs sont développés chez les pieds ayant été rognés plus que chez les autres modalités. Ces dernières se situent en retrait, elles présentent un grand nombre de pieds sans entre-cœurs ou avec des entre-cœurs très peu développés.

Sur les diagrammes suivants (Figure 23 et Figure 24), les mesures du 9 Août et du 15 Août permettent d'observer l'évolution du développement des entre-cœurs vers des classes de tailles plus importantes pour la modalité rognée.

Leur développement chez les autres modalités semble assez similaire entre elles, avec une majorité d'entre-cœurs de classe 0-5cm le 9 Août et une majorité dans la classe 5-10cm le 15 Août.

On remarque d'autre part chez ces modalités qu'il reste toujours une proportion de pieds sans entre-cœurs, sauf pour la modalité A1 dont les entre-cœurs se sont développés un peu plus rapidement, cette remarque pouvant être mise en relation avec la SECV assez élevée de cette modalité qui semble plus vigoureuse que les autres.

On peut ainsi conclure que la pratique du rognage favorise le développement des entre-cœurs comme l'énonce la bibliographie. Les filets d'ombrages ou la pose d'argile ne semble pas affecter ce développement mais il aurait fallu mettre en place ces modalités plus tôt afin d'estimer réellement leur effet.

III.3 – Rendement à la récolte

On cherche à observer un éventuel impact des modalités sur le rendement, ce dernier étant un facteur primordial pour l'entreprise et sa pérennité.

Pour cela le premier facteur étudié a été le nombre moyen de grappes par pied.

On peut ainsi observer sur la Figure 25 comme sur le Tableau 6 que le nombre de grappes par pied ne diffère pas d'une modalité à une autre. En effet le test de Kruskal-Wallis n'a révélé aucune différence significative (p -value=0,1823).

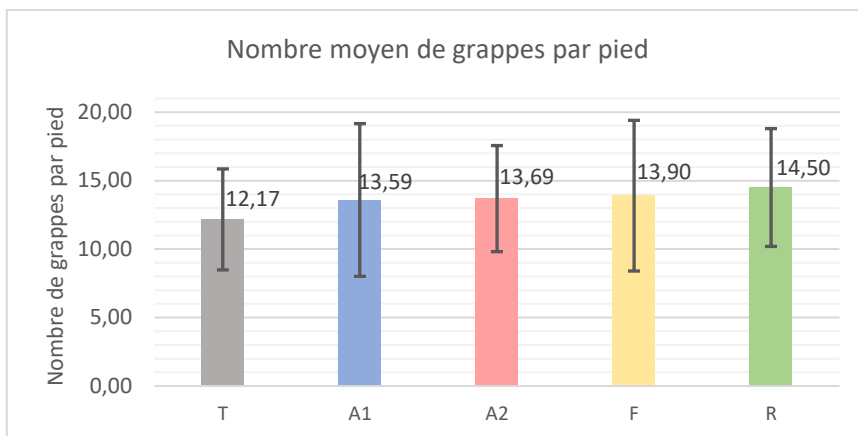


Figure 25: Histogramme du nombre moyen de grappes par pied à la vendange chez chaque modalité

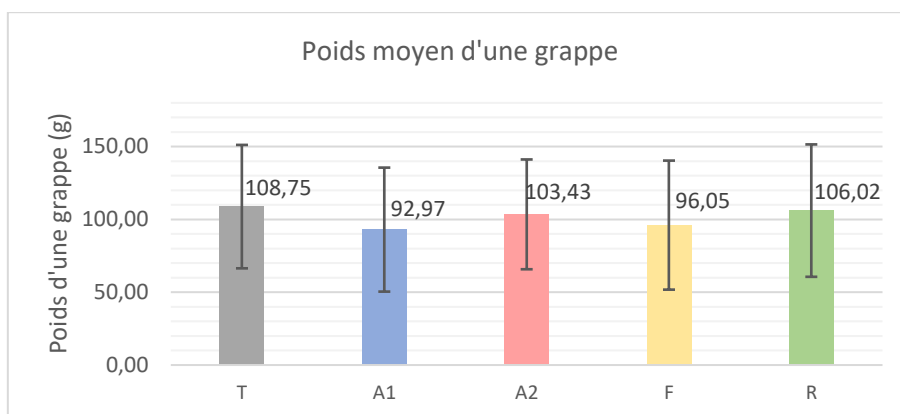


Figure 26: Histogramme du poids moyen d'une grappe à la vendange pour chaque modalité a

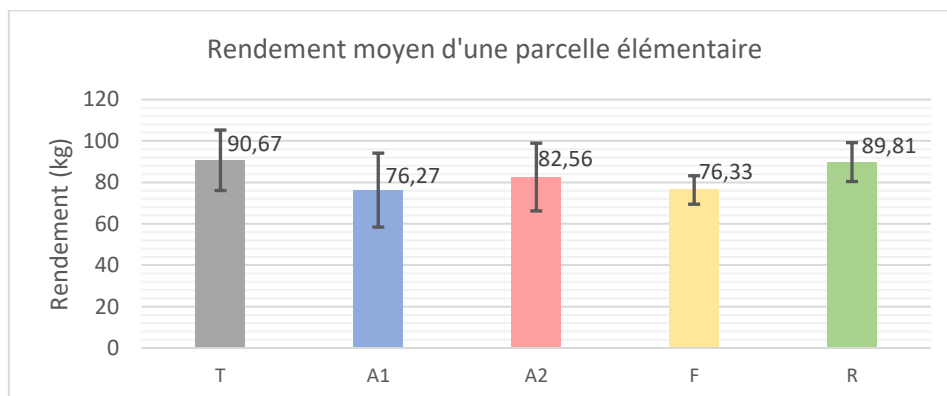


Figure 27: Histogramme des rendements moyens à la vendange de chaque modalité

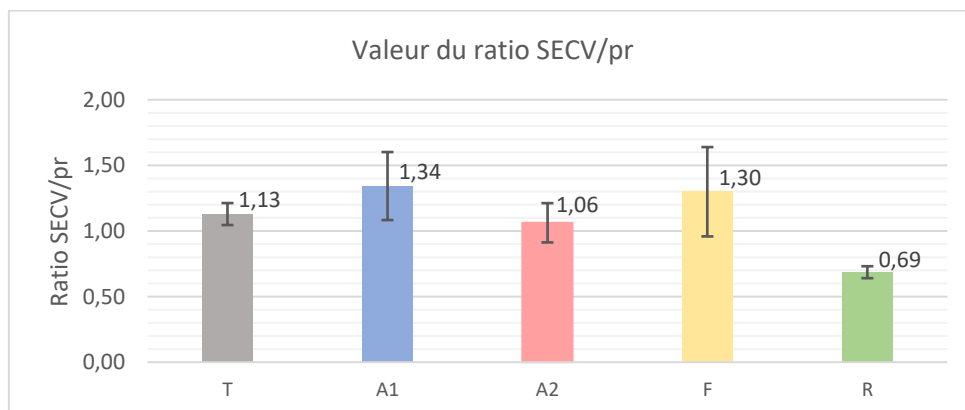


Figure 28: Histogramme des rapport feuilles/fruits moyens de chaque modalité

Tableau 6 : Tableau de valeur des p-value pour le nombre de grappes par pied à l'issu de comparaisons multiples par le test de Wilcoxon réalisé sur R

	A1 (a)	A2 (a)	F (a)	R (a)
A2 (a)	1,00	-	-	-
F (a)	1,00	1,00	-	-
R (a)	1,00	1,00	1,00	-
T (a)	1,00	0,69	1,00	0,11

Les grappes étant déjà en place avant la mise en place des modalités, il est assez logique que leur nombre de diffère pas. Il faudrait probablement observer l'évolution sur plusieurs années pour éventuellement mettre en évidence une influence des modalités sur ce paramètre.

D'autre part un second facteur étudié est le poids moyen d'une grappe (Figure 26). Il s'agit d'un paramètre très variable, les écart-types correspondants sont très importants.

Le test statistique de Shapiro a montré que l'hypothèse de normalité n'était pas respectée. Le test de Kruskal-Wallis a donc été utilisé et n'a mis en évidence aucune différence significative. (p-value=0,06074)

En accord avec l'absence de différence significative chez le nombre moyen de grappes comme chez leur poids moyen, les rendements obtenus ne semblent pas avoir été affectés par les modalités mises en place.

III.4 – Rapport feuilles/fruits

Le rapport feuille/fruit est un indicateur majeur de la relation entre les organes sources que sont les feuilles et les organes puits que sont les fruits. Il représente la surface foliaire en m² permettant de faire murir un kilogramme de raisin. (MURISIER, 1996)

Au vu des rendements obtenus, les ratios SECV/pr sont légèrement plus élevés que les SECV chez chaque modalité (

Figure 28). Cependant on retrouve une allure d'histogramme et de boxplot similaire à ceux obtenus pour la SECV. Ainsi la modalité Rognage se démarque par son ratio feuille/fruit particulièrement faible par rapport aux autres modalités.

BILAN III :

En somme, le développement végétatif est impacté notamment par le rognage. La surface foliaire limitée des vignes rognées aboutit au développement des entre-cœurs.

Les autres modalités ne semblent pas influencer ce développement. D'autre part aucune modalité n'a d'effet sur le rendement.

I. SUIVI DE MATURATION DES BAIES

Le suivi de maturation des baies a débuté le 20 Août 2019 et s'est terminé le 11 Septembre 2019 lorsque la décision de vendanger a été prise. Ce suivi permet d'avoir une idée de l'influence de chaque modalité sur l'évolution des métabolites et la qualité des baies.

IV.1 Sucres réducteurs et degré probable

Le suivi des taux de sucres des baies ainsi que de leur degré probable est une première réponse à la problématique de cette étude qui vise à réduire les degrés alcooliques des vins devenus trop élevés.

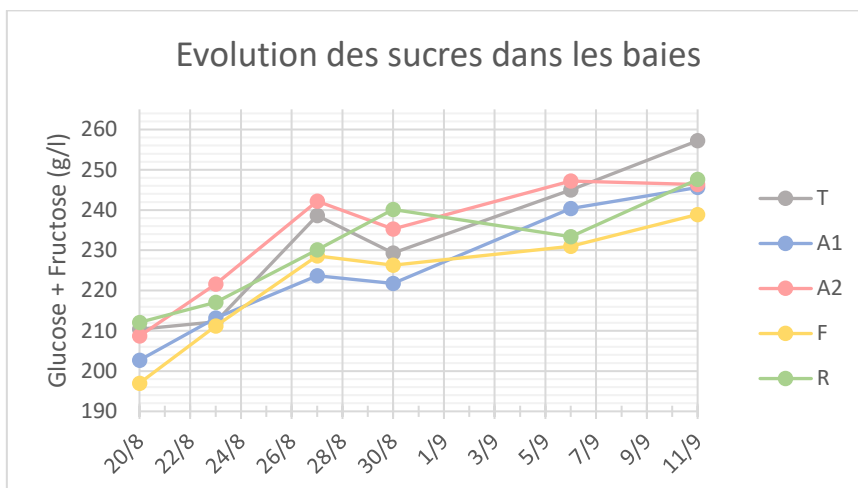


Figure 29: Graphique de l'évolution des concentrations en sucres des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019

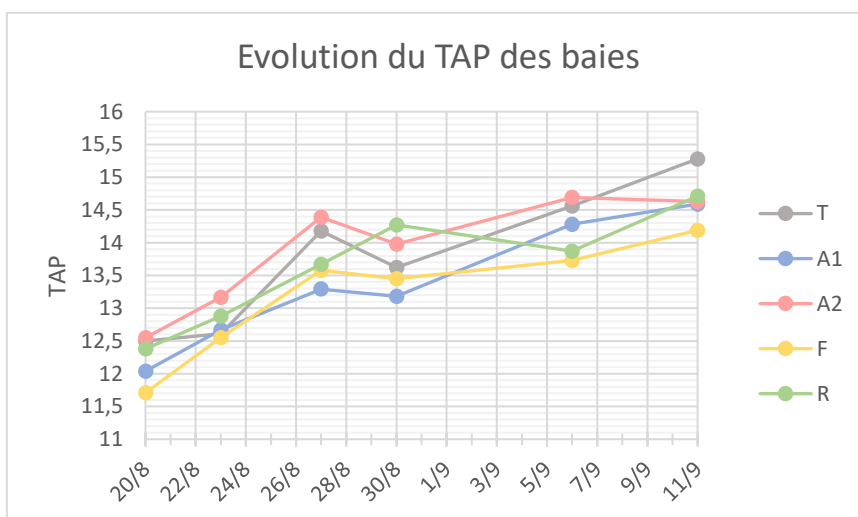


Figure 30: Graphique de l'évolution des TAP des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019

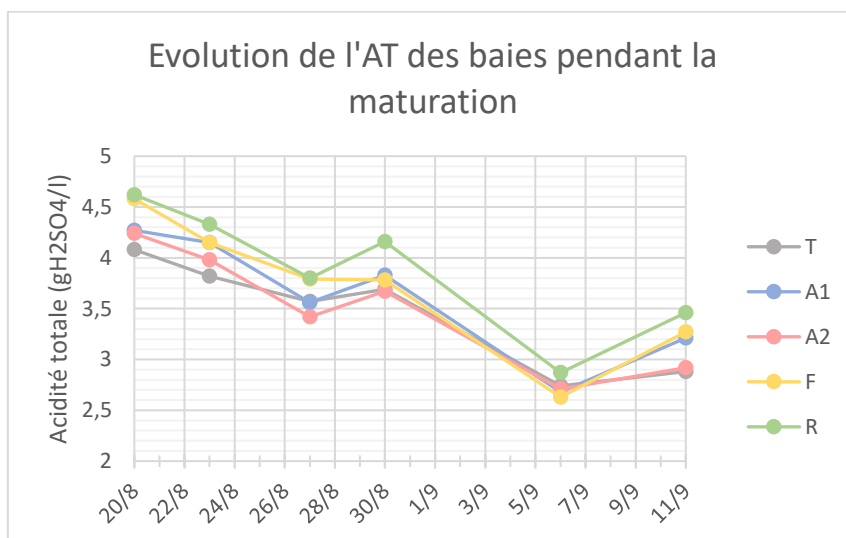


Figure 31: Graphique de l'évolution de l'acidité totale des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019

La Figure 29 et la Figure 30 montrent les évolutions des sucres et des TAP chez les cinq modalités. Le taux de sucres et le TAP étant corrélés, les deux graphiques présentent des courbes similaires.

On observe une tendance des modalités Filets et Argile 1 à présenter les valeurs de TAP les plus basses à chaque prélèvement, le témoin et la modalité Argile 2 ayant généralement les TAP les plus hauts. La modalité Rognage présente, elle, des valeurs assez variables qui ne permettent pas de conclure sur une tendance particulière.

Les analyses ayant été réalisées sur les trois blocs ensemble, il n'y a pas de répétitions exploitables afin de faire des statistiques sur la significativité des résultats. Une analyse de chaque bloc séparément aurait été préférable.

Par ailleurs le suivi ayant débuté après la fin de la véraison, le pic d'augmentation des sucres dans les baies a déjà eu lieu. Il aurait été préférable de débiter les mesures plus tôt afin d'avoir la totalité de la courbe d'évolution et observer un éventuel décalage au niveau des dates de début d'accumulation en sucres.

Les analyses de chaque bloc à la vendange et en fin de fermentation pourront permettre une meilleure identification de l'impact des modalités sur le degré alcoolique.

IV.2 Acidité des baies

La Figure 31, la Figure 32 et la Figure 33 montrent respectivement l'évolution de l'acidité totale, celle de l'acide tartrique et enfin celle de l'acide malique dans les baies.

Les valeurs de l'acide malique étant très variables et peu cohérentes, il est difficile de les analyser.

Les courbes d'évolution de l'acidité totale et de l'acide tartrique sont assez similaires. On peut observer tout au long de la maturation que les modalités rognage et filets présentent des acidités supérieures à celle des autres modalités. Le témoin ainsi que la modalité argile 2 présentent les acidités les plus faibles, la modalité Argile 1 se trouvant au centre avec une acidité souvent intermédiaire.

De même que pour les TAP précédemment, l'absence de répétitions ne permet pas de conclure sur la significativité des résultats.

IV.3 pH

L'évolution du pH des baies que l'on peut observer sur la Figure 34 fait écho à l'évolution des acides vus précédemment. En effet les modalités rognage et filets présentent des pH inférieurs à ceux des autres modalités et le témoin comme la modalité Argile 2 présentent des pH plutôt élevés par rapport aux autres modalités au cours de la maturation.

IV.4 Indice de maturité

L'indice de maturité correspond au rapport Sucres/Acides et donne ainsi une bonne idée de la maturité technologique.

L'évolution de l'indice de maturité des baies découle ici de l'évolution des sucres et des acides que l'on a pu observer précédemment.

La Figure 35 met ainsi en évidence un indice de maturité des modalités filets et rognage plus faible que celui des autres modalités, le témoin et la modalité Argile 2 présentant un indice de maturité plus élevé durant toute la maturation.

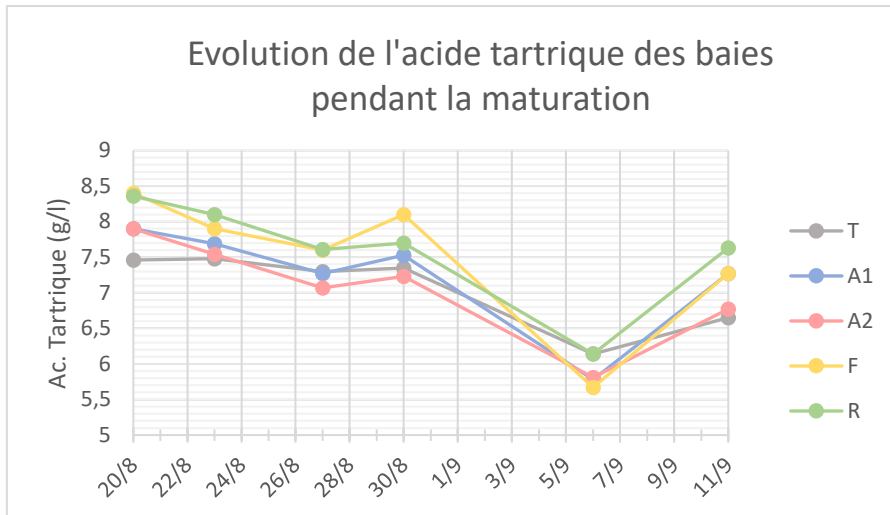


Figure 32: Graphique de l'évolution de l'acide tartrique des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019

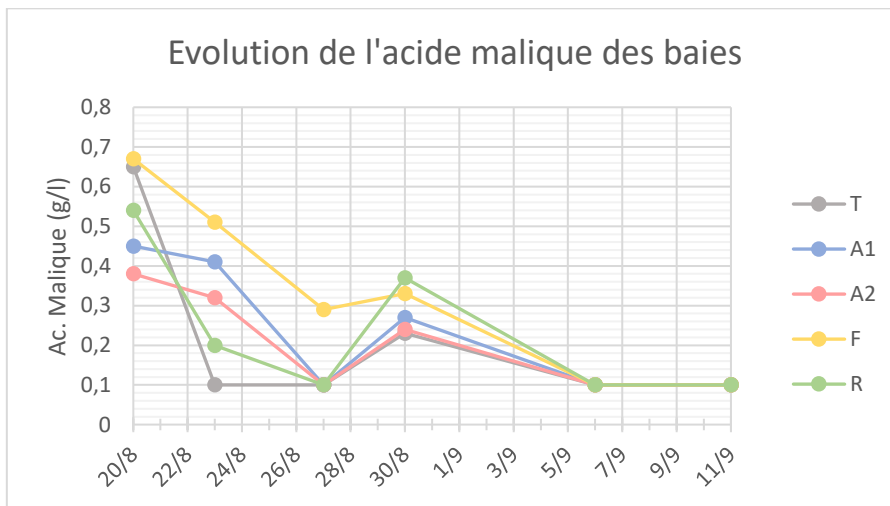


Figure 33 : Graphique de l'évolution de l'acide malique des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019

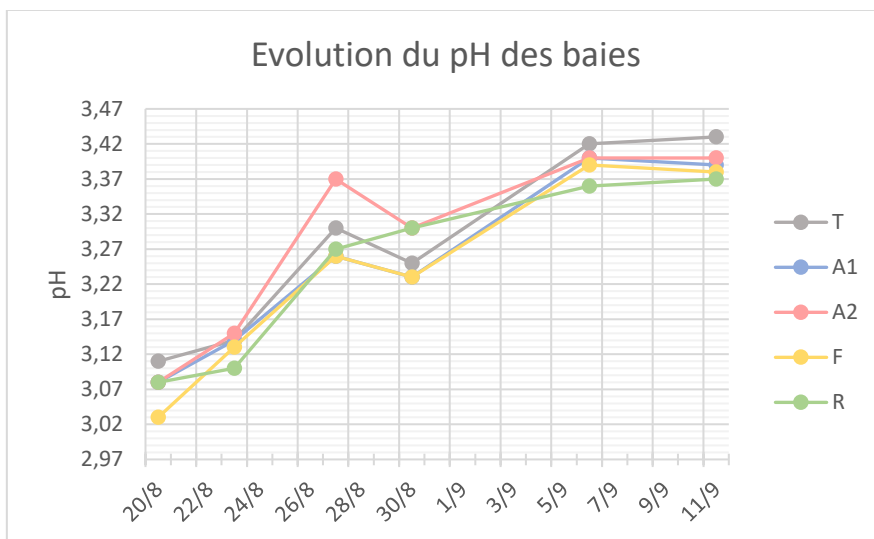


Figure 34: Graphique de l'évolution du pH des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019

CONCLUSION

L'étude menée au Château de Beaucastel avait pour objectif de trouver une ou plusieurs solutions permettant de s'adapter au changement climatique. Il s'agissait notamment de remédier à la hausse des degrés alcooliques tout en conservant la qualité du vin. Après étude bibliographique, le rognage, la pose de filets d'ombrage et la pulvérisation d'argile blanche ont été les trois stratégies mises en place afin de ralentir la maturation des baies et aboutir à des taux de sucres plus faibles lors de la vendange.

Comme le mentionne la bibliographie, les mesures réalisées montrent que la modalité rognée présente une surface foliaire ainsi qu'un rapport feuilles/fruits très différents des autres modalités. De même les modalités correspondant à la pose des filets d'ombrages et à la pulvérisation d'argile entraînent une diminution de la température des feuilles significative. Cependant, les résultats obtenus quant à la maturation des baies et notamment le degré alcoolique probable des moûts ne permettent pas de conclure sur l'efficacité des différentes stratégies. La pose de filets d'ombrages ainsi que la pulvérisation d'argile à 20g/l semblent aboutir à des moûts ayant des degrés alcooliques inférieurs par rapport aux autres modalités. Néanmoins ces résultats ne permettent pas de mettre en évidence d'éventuelles différences significatives car les analyses ne sont pas répétées. En effet afin de mettre en évidence un véritable impact des modalités étudiées, il eut fallu avoir des répétitions à chaque analyse, ce qui n'a pas été possible ici.

Par ailleurs l'important déficit hydrique subi par les vignes au cours de la saison impacte très probablement les effets des différentes modalités et ainsi les résultats obtenus. Il aurait été intéressant de pouvoir évaluer plus précisément l'effet de chaque modalité sur l'activité photosynthétique et l'évapotranspiration des plantes pendant la saison.

Le déficit hydrique aurait lui aussi pu être analysé plus en profondeur, avec des mesures de potentiel hydrique régulière tout au long du développement de la vigne ou encore des mesures du $\delta^{13}\text{C}$.

Au vu des résultats de cette étude et des contraintes opérationnelles, il semble nécessaire pour des résultats plus exploitables de travailler sur une échelle de temps supérieure et un plus grand nombre de mesures.

L'étude se poursuit cependant actuellement en cave avec la fermentation des raisins en cuve. Les résultats issus des analyses sur vins apporteront éventuellement des informations complémentaires qu'il sera bon d'approfondir.

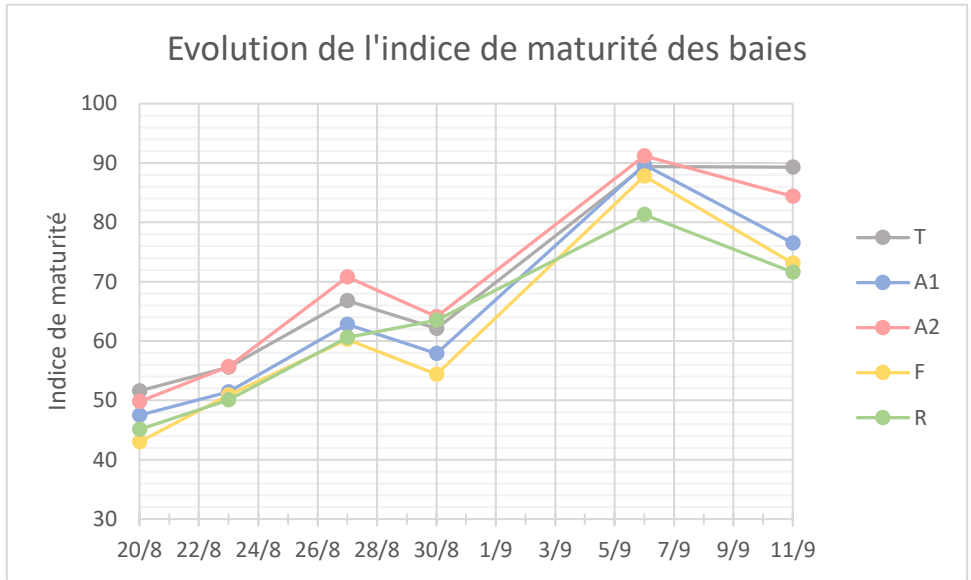


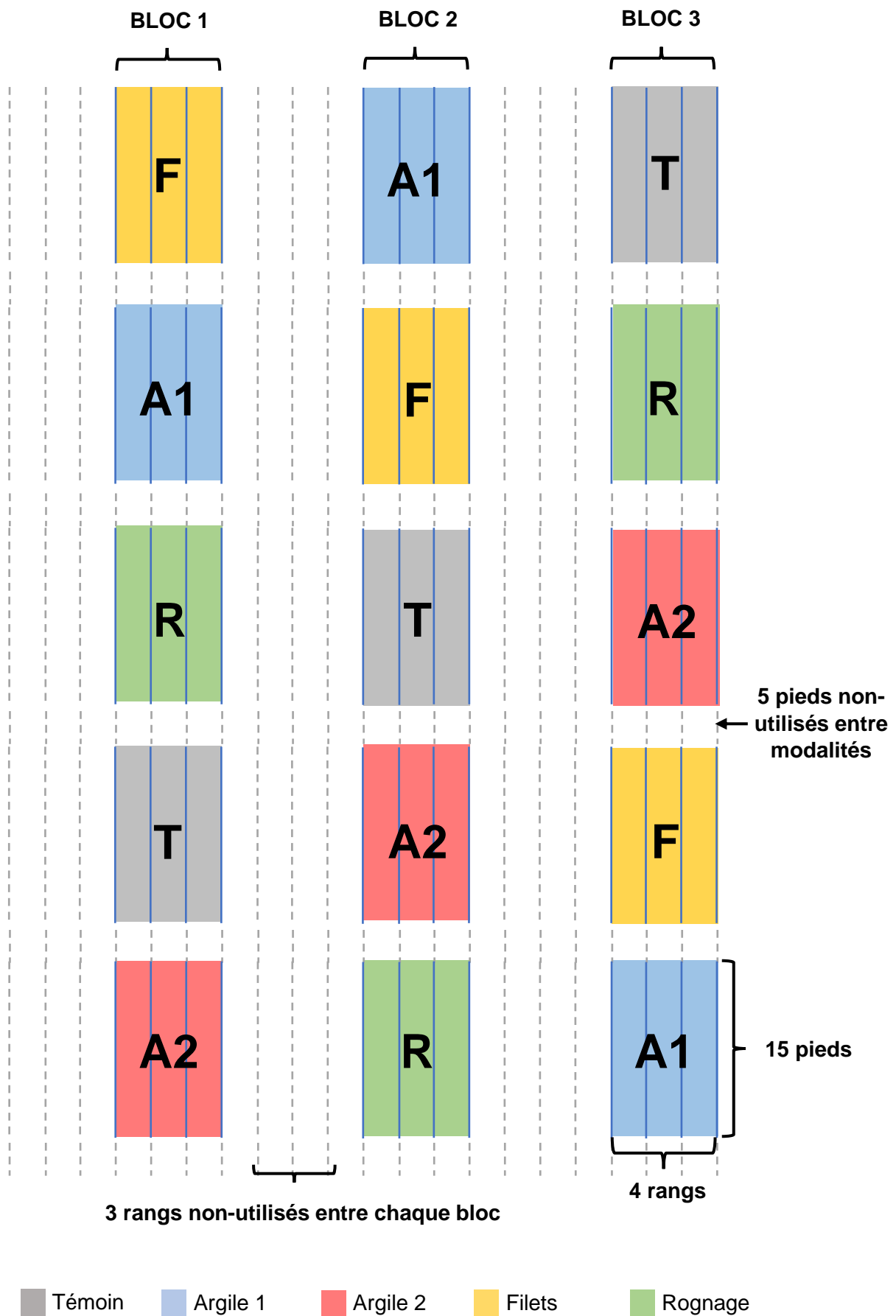
Figure 35 : Graphique de l'évolution de l'Indice de maturité des baies pendant la maturation du 20 Août au 11 Septembre 2019

ANNEXES

Annexe 1 : Vue satellite des parcelles du Château de Beaucastel sur l'AOC Châteauneuf-du-pape. (BCL=Château de Beaucastel)



Annexe 3 : Schéma du dispositif expérimental



Annexe 4 : Photos des différentes modalités mises en place

➤ Rognage

Hauteur de
végétation du
Témoin



Hauteur de
végétation du
Rognage

➤ Filets





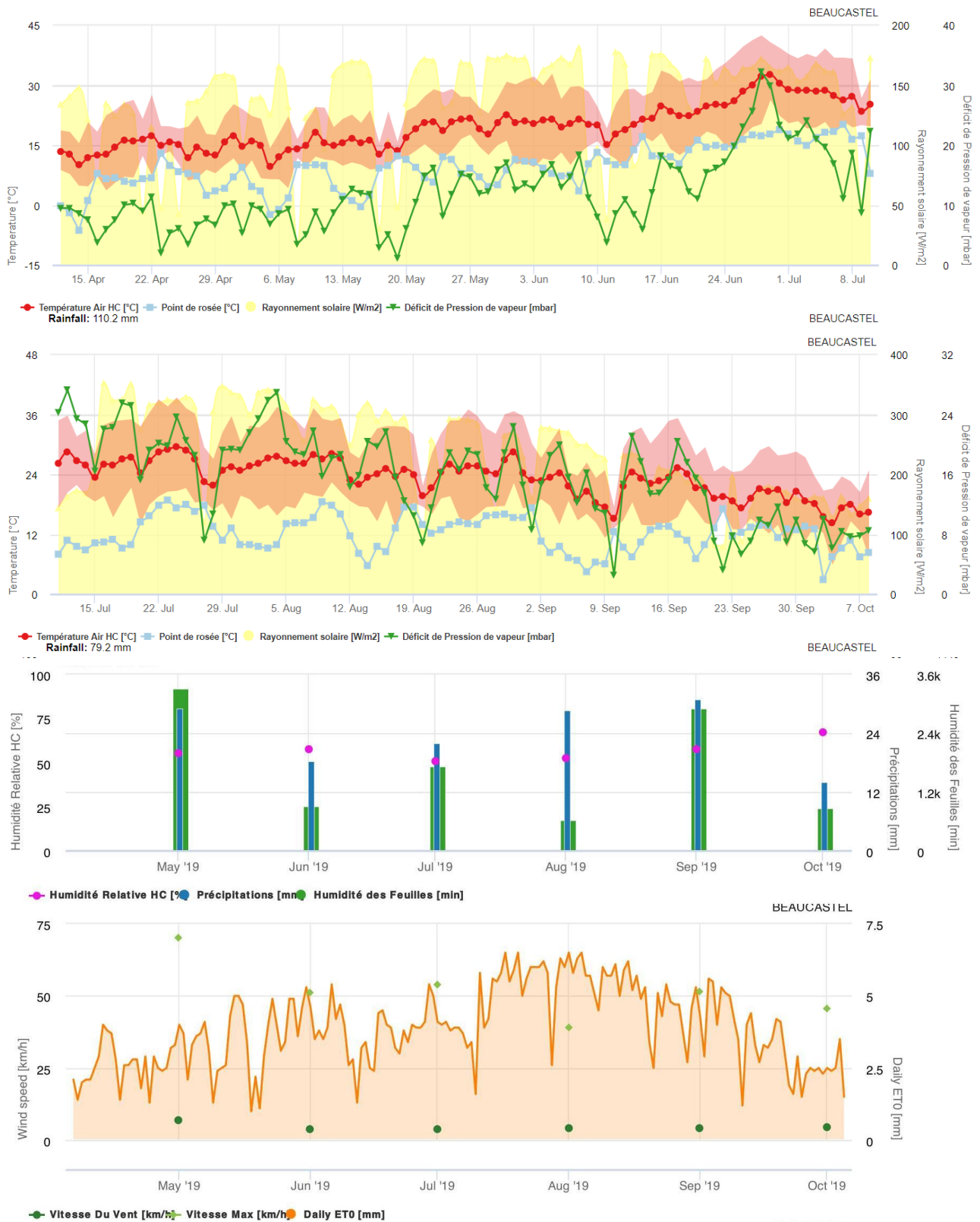
➤ **Argile**



Végétation pulvérisée
avec de l'argile

Végétation sans
pulvérisation d'argile

Annexe 5 : Données météorologique de la station du Château de Beaucastel (Source : FieldClimate)



Annexe 6 : Résultats d'analyse des prélèvements en grappes entre le 20 Août et le 11 Septembre



Château de BEAUCASTEL
84350 COURTHEZON

le 20/08/2019

RAPPORT D'ANALYSES N°13835

N°Labo	N° cuve	Appellation / Désignation	N° cuvée	Couleur	Millésime	D°prob 16.83 (%Vol)	GF irtf (g/l)	Sucre refract (g/l)	AT irtf (gH2SO4/l)	pH irtf	Ac Mal. irtf (g/l)	Ac Tartrique irtf (g/l)	N ass irtf (mg/l)	K irtf (mg/l)	Indice Matu
190820079		BCL-TEMOIN		Raisi	2019	12.50	210.4	210.4	4.08	3.11	0.65	7.46	134	1082	51.6
190820080		BCL-ROGNAGE		Raisi	2019	12.38	208.3	212.1	4.62	3.06	0.54	8.36	134	1192	45.1
190820081		BCL-A1		Raisi	2019	12.04	202.7	201.9	4.27	3.08	0.45	7.90	167	1059	47.5
190820082		BCL-FILET		Raisi	2019	11.71	197.0	201.9	4.58	3.03	0.67	8.40	155	1148	43.0
190820083		BCL-A2		Raisi	2019	12.55	211.3	208.7	4.24	3.08	0.38	7.90	124	1177	49.8



ESSAIS STAGE

le 23/08/2019

RAPPORT D'ANALYSES N°13893

N°Labo	N° cuve	Appellation / Désignation	N° cuvée	Couleur	Millésime	D°prob 16.83 (%Vol)	GF irtf (g/l)	Sucre refract (g/l)	AT irtf (gH2SO4/l)	AT manu (gH2SO4/l)	pH irtf	pH manu	Ac Mal. irtf (g/l)	Ac Tartrique irtf (g/l)	N ass irtf (mg/l)	K irtf (mg/l)	Indice Matu
190823043		TEMOIN		Raisi	2019	12.61	212.2	220.5	3.82	3.87	3.14	3.18	<0.20	7.48	180	1078	55.6
190823044		A1		Raisi	2019	12.67	213.2	212.1	4.15		3.14		0.41	7.69	176	1068	51.4
190823045		A2		Raisi	2019	13.17	221.6	222.2	3.98		3.15		0.32	7.54	123	1188	55.7
190823046		FILETS		Raisi	2019	12.55	211.2	212.1	4.15		3.13		0.51	7.90	156	1132	50.9
190823047		ROGNAGE		Raisi	2019	12.88	216.7	217.1	4.33	4.26	3.10	3.11	0.20	8.10	134	1194	50.1



ESSAIS STAGE

le 27/08/2019

RAPPORT D'ANALYSES N°13938

N°Labo	N° cuve	Appellation / Désignation	N° cuvée	Couleur	Millésime	D°prob 16.83 (%Vol)	GF irtf (g/l)	Sucre refract (g/l)	AT irtf (gH2SO4/l)	pH irtf	Ac Mal. irtf (g/l)	Ac Tartrique irtf (g/l)	N ass irtf (mg/l)	K irtf (mg/l)	Indice Matu
190827064		TEMOIN		Raisi	2019	14.18	238.6	238.9	3.57	3.30	<0.20	7.30	152	1346	66.8
190827065		FILETS		Raisi	2019	13.58	228.6	228.8	3.79	3.26	0.29	7.60	142	1396	60.3
190827066		ROGNAGE		Raisi	2019	13.67	230.1	230.6	3.80	3.27	<0.20	7.61	154	1381	60.6
190827067		A1		Raisi	2019	13.29	223.7	222.2	3.56	3.26	<0.20	7.27	177	1217	62.8
190827068		A2		Raisi	2019	14.39	242.2	240.7	3.42	3.37	<0.20	7.07	154	1426	70.8



ESSAIS STAGE

le 30/08/2019

RAPPORT D'ANALYSES N°14015

N°Labo	N° cuve	Appellation / Désignation	N° cuvée	Couleur	Millésime	D°prob 16.83 (%Vol)	GF irtf (g/l)	Sucre refract (g/l)	AT irtf (gH2SO4/l)	pH irtf	Ac Mal. irtf (g/l)	Ac Tartrique irtf (g/l)	N ass irtf (mg/l)	K irtf (mg/l)	Indice Matu
190830050		TEMOIN		Raisi	2019	13.62	229.3	228.8	3.69	3.25	0.23	7.35	145	1377	62.1
190830051		A1		Raisi	2019	13.18	221.8	220.5	3.83	3.23	0.27	7.53	181	1309	57.9
190830052		A2		Raisi	2019	13.98	235.3	235.6	3.67	3.30	0.24	7.23	147	1395	64.1
190830053		ROGNAGE		Raisi	2019	14.27	240.1	240.7	3.78	3.30	0.33	7.70	126	1533	63.5
190830054		FILETS		Raisi	2019	13.45	226.3	225.5	4.16	3.23	0.37	8.10	160	1478	54.4

ESSAIS STAGE

le 06/09/2019

RAPPORT D'ANALYSES N°14086

N°Labo	N° cuve	Appellation / Désignation	N° cuvée	Couleur	Millesime	D°prob 16.83 (%Tol)	GF irtf (g/l)	AT irtf (gH ₂ SO ₄ /l)	pH irtf	Ac Mal. irtf (g/l)	Ac Tartrique irtf (g/l)	N ass irtf (mg/l)	K irtf (mg/l)	Indice Matu
190905042		TEMOIN		Raisir	2019	14.56	245.0	2.74	3.42	<0.20	6.14	177	1163	89.4
190905043		A1		Raisir	2019	14.28	240.4	2.68	3.40	<0.20	5.78	181	1029	89.7
190905044		A2		Raisir	2019	14.69	247.2	2.71	3.40	<0.20	5.81	129	1107	91.2
190905045		FILETS		Raisir	2019	13.73	231.0	2.63	3.39	<0.20	5.67	153	1106	87.8
190905046		ROGNAGE		Raisir	2019	13.87	233.4	2.87	3.36	<0.20	6.14	166	1121	81.3

ESSAIS STAGE

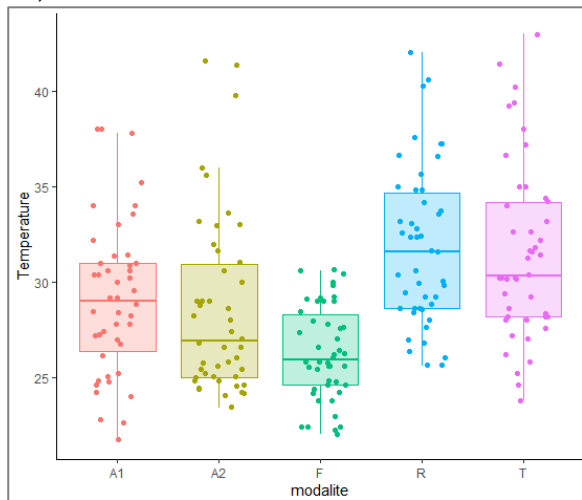
le 11/09/2019

RAPPORT D'ANALYSES N°14172

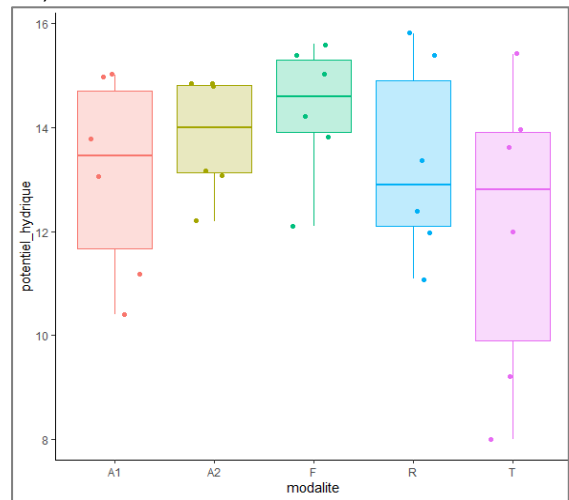
N°Labo	N° cuve	Appellation / Désignation	N° cuvée	Couleur	Millesime	D°prob 16.83 (%Tol)	GF irtf (g/l)	AT irtf (gH ₂ SO ₄ /l)	pH irtf	Ac Mal. irtf (g/l)	Ac Tartrique irtf (g/l)	N ass irtf (mg/l)	K irtf (mg/l)	Indice Matu
190911044		TEMOIN		Raisir	2019	15.28	257.2	2.88	3.43	<0.20	6.65	133	1361	89.3
190911045		A1		Raisir	2019	14.59	245.6	3.21	3.39	<0.20	7.27	159	1365	76.5
190911046		A2		Raisir	2019	14.63	246.3	2.92	3.40	<0.20	6.77	142	1329	84.4
190911047		FILETS		Raisir	2019	14.19	238.9	3.27	3.38	<0.20	7.27	126	1387	73.1
190911048		ROGNAGE		Raisir	2019	14.71	247.6	3.46	3.37	<0.20	7.63	128	1462	71.6

Annexe 7 : Boxplot des différentes analyses statistiques réalisées sur R

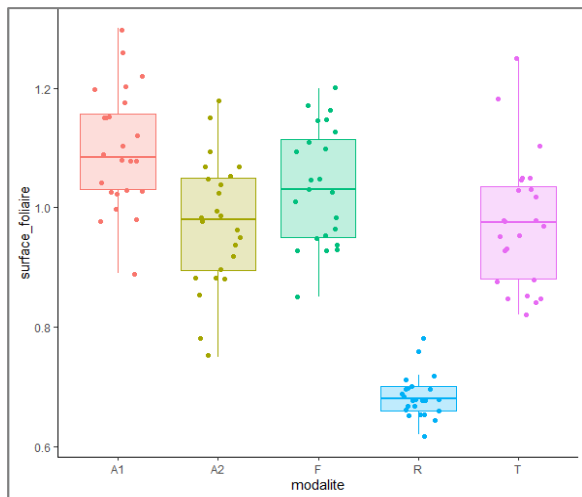
a)



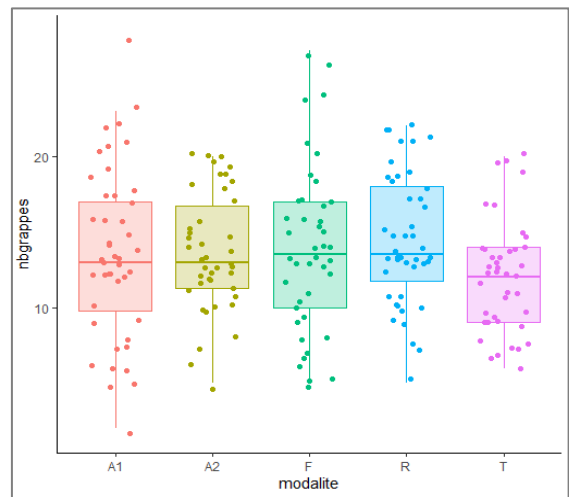
b)



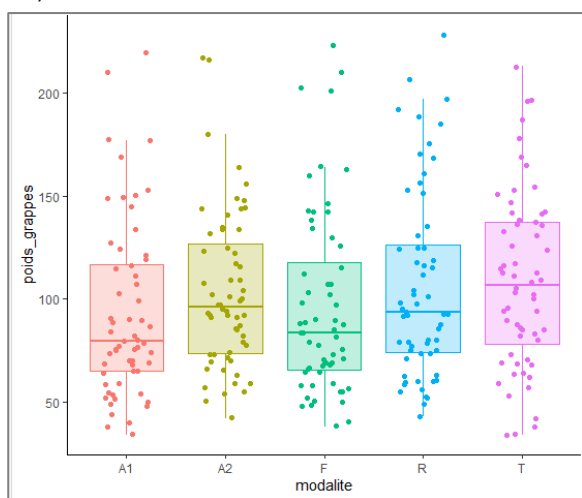
c)



d)



e)



BIBLIOGRAPHIE

- BELLIA Sandrine, et DOUGUEDROIT Annick, 2007. « Impact du réchauffement sur les étapes phénologiques du développement du Grenache et de la Syrah dans les Côtes du Rhône et les Côtes de Provence (1976-2000) ». *Global warming*, 12.
- BOIS Benjamin. s. d. « Impacts du changement climatique sur les vignobles et remèdes proposés », 14.
- BOURGUIGNON Lydia, 2015. « Influence du réchauffement climatique sur le cycle de la vigne au Domaine de la Romanée Conti », 39.
- DI VAIO, Claudio, Nadia Marallo, Rosario Di Lorenzo, et Antonino Pisciotta. 2019. « Anti-Transpirant Effects on Vine Physiology, Berry and Wine Composition of Cv. Aglianico (Vitis Vinifera L.) Grown in South Italy ». *Agronomy* 9 (5): 244.
- DUFOURCQ, Thierry. s. d. « Adaptation de la conduite du vignoble : la gestion du rapport feuilles/fruits », 4.
- GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat), 2015. *Changements climatiques 2014: rapport de synthèse*.
- JACKSON, Ronald. 2008. *Wine Science: Principles and Applications*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Acad. Press.
- KENNEDY James. 2002. « Understanding Grape Berry Development », 6.
- LEBON E. s. d. « Changements climatiques : Quelles conséquences pour la viticulture ? », 6.
- LEBON E., et Garcia de Cortazar-Atauri I. 2014. « Dans un contexte de changement climatique, quels sont les impacts de la sécheresse sur la vigne et sur le devenir des vignobles ? L'exemple du Languedoc ». *Innovations Agronomiques* 38: 12.
- LOBOS, Gustavo A., César Acevedo-Opazo, Alejandro Guajardo-Moreno, Héctor Valdés-Gómez, James A. Taylor, et V. Felipe Laurie. 2015. « Effects of Kaolin-Based Particle Film and Fruit Zone Netting on Cabernet Sauvignon Grapevine Physiology and Fruit Quality ». *OENO One* 49 (2): 137.
- MASLIN, Mark. 2014. *Climate Change : a very short introduction*. Oxford.
- MIRA DE ORDUÑA, Ramón. 2010. « Climate Change Associated Effects on Grape and Wine Quality and Production ». *Food Research International* 43 (7): 1844-55.
- MOISSELIN Jean-Marc, Michel Schneider, et Claire Canellas. 2002. « Les changements climatiques en France au XX^e siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. » *La Météorologie* 8 (38): 45.
- MURISIER, François M. 1996. « Optimisation du rapport feuille-fruit de la vigne pour favoriser la qualité du raisin et l'accumulation des glucides de réserve *** relation entre le rendement et la chlorose ». ECOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE ZURICH.
- PALLIOTTI, Alberto, Sergio Tombesi, Oriana Silvestroni, Vania Lanari, Matteo Gatti, et Stefano Poni. 2014. « Changes in Vineyard Establishment and Canopy Management Urged by Earlier Climate-Related Grape Ripening: A Review ». *Scientia Horticulturae* 178 (octobre): 43-54.

- POUGET, Robert. 1963. « Recherches physiologiques sur le repos végétatif de la vigne (*Vitis vinifera* L.) : la dormance des bourgeons et le mécanisme de sa disparition ». Institut national de la recherche agronomique.
- QUENOL, Hervé, Grosset Marie, Gérard Barbeau, Cornelis Van Leeuwen, Marco HOFMANN, Chris Foss, Liviu Irimia, et al. 2014. « Adaptation of viticulture to climate change: high resolution observations of adaptation scenario for viticulture: the adviclim european project ». *Bulletin de l'OIV* 87 (1001-1002-1003): 395-406.
- SEGUIN, Bernard. 2007. « Le réchauffement climatique et ses conséquences pour la viticulture ». *Global warming*, 9.
- TEERAPAT, Tepkaewa, Duangsrissai Sutsawat, Vaithanomsat Pilanee, et Jutamane Kanapol. 2014. « Photosynthetic performance, carbohydrate contents and yield affected by kaolin particle film application in grape ». In *International Bioscience Conference*. Phuket, Thailand.
- TODA, F Martínez De, J C Sancha, W Zheng, et P Balda. s. d. « Leaf Area Reduction by Trimming, a Growing Technique to Restore the Anthocyanins : Sugars Ratio Decoupled by the Warming Climate », 4.
- TRENBERTH, Kevin E, Philip D Jones, Peter Ambenje, Roxana Bojariu, David Easterling, Albert Klein Tank, David Parker, et al. s. d. « Observations: Surface and Atmospheric Climate Change », 102.
- VAN LEEUWEN, Cornelis, et Philippe Darriet. 2016. « Le changement climatique en viticulture : les leviers d'adaptation au vignoble. » In . Assises des Vins du Sud-ouest, Toulouse.
- VAN LEEUWEN, C. van. 2010. « Terroir: The Effect of the Physical Environment on Vine Growth, Grape Ripening and Wine Sensory Attributes ». In *Managing Wine Quality*, 273-315. Elsevier.
- VAN LEEUWEN, C Van, O Trégoat, et X Choné. 2003. « Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin », 14.
- VAN LEEUWEN, Cornelis van, et Philippe Darriet. 2016. « The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality ». *Journal of Wine Economics* 11 (1): 150-67.
- VIGUIE, Vincent, Franck Lecocq, et Jean-Marc Touzard. 2014. « VITICULTURE AND ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE ». *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 7.
- VIVAS, Nicolas, Nathalie St-Cricq de Gaulejac, Tonnellerie Demptos, et Yves Glories. s. d. « Extrait de « Les composés phénoliques » Journée Technique (compte-rendu) », 10.

Comment s'adapter au changement climatique et à la hausse des degrés alcooliques par le biais des pratiques culturales tout en conservant la qualité des vins ?

Depuis une cinquantaine d'années, des modifications climatiques importantes sont observables sur la planète, en raison de l'augmentation des gaz à effet de serre. La hausse des températures de surface en est la conséquence principale, mais on peut également remarquer une perturbation des précipitations ainsi qu'une augmentation des phénomènes climatiques extrêmes. Dans le monde viticole, cette augmentation de la température induit de nombreux changements, aussi bien sur les régions viticoles et leur climat que sur le comportement des vignes elles-mêmes. Le cycle de la vigne devient en effet de plus en plus précoce en réponse à la hausse des températures, ce qui induit des modifications de la maturation des baies et notamment de leur concentration en sucres à la vendange. Les hautes teneurs en sucres des moûts aboutissent ainsi à des vins de plus en plus alcoolisés.

L'expérimentation mise en place ici a consisté en l'application à la vigne de quatre modalités visant à diminuer les degrés alcooliques ainsi qu'un témoin. Les quatre modalités étudiées sont les suivantes : un rognage sévère ; la pose de filets d'ombrage sur la végétation et les fruits ; la pulvérisation d'une solution d'argile blanche à 20g/l et la pulvérisation d'une solution d'argile blanche à 60g/l. Des mesures ont été faites tout au long du cycle de la vigne concernant le statut hydrique des plantes, leur développement végétatif ainsi que l'évolution des métabolites au sein des baies au cours de la maturation.

Les prélèvements pour analyses de maturités ne prenant pas en compte les répétitions, les résultats obtenus ne permettent pas de trancher quant à une modalité qui diminuerait significativement le taux de sucres des baies. Cependant les modalités Filets et Argile à 20g/l semblent montrer une tendance à contenir des taux de sucres et des TAP moins importants que les autres.

Par ailleurs, la prise en compte des autres facteurs pouvant affecter ces concentrations est primordiale. Il est cependant complexe de pouvoir tous les appréhender.

Mots-clés : Changement climatique – Adaptation – Degré alcoolique – Filets – Argile – Rognage

How to adapt viticulture practices to climate change and increasing alcohol degrees without changing wines typicity?

Over the last fifty years, important climatic changes occurred on Earth because of the increasing of greenhouse gas levels. Temperatures are the first to be affected by this Climate change, but an increase of the frequency of extreme climatic events can also be observed as well as an alteration of rainfalls quantity.

This evolution of climate factors, and particularly the higher temperatures, affect wine-growing regions and vines. Indeed, vines phenology stages are occurring a lot earlier than usual which is leading to an increase of grape sugar concentrations and high wine alcohol levels.

Therefore, the goal of this study is to reduce this high level of alcohol. Four different possible solutions are tried here: a severe trimming, the use of shading nets, a spray of kaolin on leaves and fruits with a concentration of 20g/l and finally a spray of kaolin on leaves and fruits with a concentration of 60g/l.

Measurements about vines water-stress, vegetative growth, and grapes composition during ripening are made regularly during the season.

Results analysis has been quite difficult because of the lack of repetitions. Thus, no conclusion could be reached with those results. Nevertheless, they seem to indicate that the net and the lowest concentration of kaolin lead to lower alcohol levels. It would have been necessary to have further measurements.

Moreover, it's important to consider the other factors which may impact grapes compositions, even if it's a bit complicated to understand and approach all of them in this study.

Key-words: Climate change – Adaptation – Alcoholic degree – Nets – Kaolin - Trimming