



HAL
open science

Influence de la température sur le comportement de la vigne dans le contexte du domaine Château Cheval Blanc

Émilie Gorisse

► **To cite this version:**

Émilie Gorisse. Influence de la température sur le comportement de la vigne dans le contexte du domaine Château Cheval Blanc. Sciences du Vivant [q-bio]. 2017. dumas-01870021

HAL Id: dumas-01870021

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01870021>

Submitted on 7 Sep 2018

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.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE



**Influence de la température sur le comportement
de la vigne dans le contexte du domaine
Château Cheval Blanc**

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
présenté pour l'obtention du
DIPLÔME D'INGÉNIEUR AGRONOME
option : Viticulture Œnologie

Par Emilie GORISSE



Année de soutenance : 2017

**Organisme d'accueil : Château Cheval Blanc
1, Cheval Blanc
33330, Saint-Emilion**

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
présenté pour l'obtention du
DIPLÔME D'INGÉNIEUR AGRONOME
option : Viticulture Œnologie

**Influence de la température sur le comportement
de la vigne dans le contexte du domaine
Château Cheval Blanc**

par
Emilie GORISSE

Mémoire préparé sous la direction de :
Anne PELLEGRINO

Organisme d'accueil :
Château Cheval Blanc

Présenté le : 03 novembre 2017

Membres du jury :
Anne PELLEGRINO
Kees VAN LEEUWEN

Maîtres de stage :
Pierre-Olivier CLOUET
Kees VAN LEEUWEN

REMERCIEMENTS

Si mon stage de fin d'études s'est aussi bien déroulé, c'est grâce à l'intervention plus ou moins directe de nombreuses personnes que je tiens tout particulièrement à remercier ici.

En premier lieu je tiens à remercier M. Pierre Lurton pour son accueil, sa simplicité et sa sympathie. Merci de m'avoir ouvert les portes de ce domaine où j'ai pu satisfaire mon envie d'apprendre et de prendre des responsabilités tout en étant intégrée à des équipes formidables.

Je remercie aussi Pierre-Olivier Clouet qui, au-delà de son rôle de maître de stage, m'a fait découvrir l'énergie qui anime ce domaine aussi prestigieux que surprenant.

Les remerciements que j'adresse maintenant à Kees Van Leeuwen ne sauraient être à la hauteur de tout ce qu'il m'a apporté durant mon stage, que ce soit en termes de connaissances et de conseils mais aussi de par son humilité et ses encouragements.

Il en va de même pour Laure de Rességuier qui a pris le temps de m'apprendre et de me guider tout au long de mon stage.

Je remercie également Anne Pellegrino, qui a tutoré mon stage et ce mémoire, pour ses conseils.

Je tiens à remercier Nicolas Corporandy et Betty Boyé-Rateau pour leur accueil au pôle viticole et la confiance qu'ils m'ont accordée.

Merci aussi à Théo Petitjean pour ses conseils, sa disponibilité et sa bonne humeur.

De même je remercie mes trois co-stagiaires, Dylan Jaillet, Camille Giraud et Maxime Gasnier, ainsi que Lise Cahuzac, pour l'ambiance et l'énergie qu'ils ont apportées.

Enfin j'adresse mes sincères remerciements à l'ensemble des employés de Château Cheval Blanc qui m'ont accueillie et rapidement intégrée. Qu'ils soient du pôle viticole, des bureaux ou du chai, tous ont su m'apporter connaissances, conseils et sympathie et ont contribué à mon épanouissement au cours de ce stage.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	5
SOMMAIRE	7
LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX	10
INTRODUCTION.....	11
CADRE DE L'ETUDE	12
A - La relation vigne-température	13
1 - L'effet de la température sur le développement de la vigne	13
2 - Les indices bioclimatiques	13
B - Le changement climatique	16
1 - Les scenarii et les conséquences du réchauffement climatique	17
2 - La nécessité de s'adapter.....	19
C - L'étude du climat local.....	21
1 - Variabilité spatio-temporelle de la température.....	21
2 - Notion d'échelles	21
3 - Des projets à échelle fine	23
D - L'étude de la température au Château Cheval Blanc	24
1 - Les enjeux pour un domaine historique	25
2 - Plusieurs échelles de suivis au sein d'un même domaine.....	25
3 - Les objectifs de cette étude	27
MATERIELS ET METHODES	28
A - Les dispositifs de suivi de la température	29
1 - Les appareils de mesure de la température	29
2 - Les dispositifs mis en place	31
B - Les suivis agronomiques	34
1 - La réponse de la vigne aux températures extrêmes.....	35
2 - La phénologie.....	35
3 - La maturation	39
C - L'analyse des données.....	39
1 - La constitution des bases de données.....	39
2 - Les analyses issues de ces données.....	41
RESULTATS ET DISCUSSION	44
A - Informations issues du dispositif au niveau de la station Météo-France	45
1 - Evolution générale de la température	45
2 - Quels facteurs influent sur la qualité du millésime le mois précédant la vendange ?	45
3 - Ecart entre les données de la station Météo-France et celles des capteurs.....	47
4 - Impact de la végétation sur la température	49
5 - Conclusions et améliorations à apporter au dispositif	49
B - Résultats issus des données du réseau de capteurs sur Cheval Blanc	51
1 - Variabilité de la température sur l'ensemble du domaine.....	51

2 - Impact du type de sol, du cépage, de la latitude, de l'altitude et du type de temps sur la température	51
3 - Limites et améliorations à apporter au réseau de capteurs.....	53
C - Résultats issus des données du dispositif d'étude du gradient thermique vertical.....	55
1 - Impact de la hauteur sur la température et les indices bioclimatiques.....	55
2 - Impact du travail du sol sur la température.....	59
3 - Une modalité (Hauteur x Travail du sol) pour diminuer la température ?.....	61
4 - Améliorations possibles du dispositif d'étude du gradient thermique vertical.....	61
D - Etude des nuits de gel d'avril 2017	61
1 - Deux vagues de froid	61
2 - Variabilité spatiale de la température ces nuits-là	63
3 - Gradients thermiques verticaux des 4 nuits	63
4 - Les conséquences sur la vigne	65
E - Comparaison des deux générations	67
1 - Des phénologies décalées.....	67
2 - Comparaison des intervalles de temps entre stades phénologiques.....	67
3 - Comparaison des besoins thermiques des deux générations.....	67
4 - Limites de cette comparaison.....	69
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	73
ANNEXES	77

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Stades phénologiques de la vigne d'après Baggiolini (1952)	12
Figure 2 : Evolution de la température moyenne à la surface du globe de 1950 à l'horizon 2100 relativement à la période 1986-2005 selon les RCP2.6 et RCP8.5, et températures moyennes sur 2081-2100 pour les quatre RCP (GIEC 2013).	16
Figure 3 : Projections de la carte de France selon les régions viticoles définies par les indices de Winkler aux horizons 2031-2050 (à gauche) et 2081-2100 (à droite) selon les RCP2.6 (en haut), RCP4.5 (au milieu) et RCP8.5 (en bas), comparativement à la carte de la période de référence 1986-2006 (au milieu en haut).	16
Figure 4 : Modifications des caractéristiques (température T_0 , densité de la vapeur d'eau ρ_0 et altitude z_0) de la couche limite au passage d'une surface nue, lisse et sèche à une surface végétalisée et donc plus rugueuse, fraîche et humide.	20
Figure 5 : Répartition des 90 capteurs de température du projet Life-AdviClim sur le Libournais.....	22
Figure 6 : Parcellaire du domaine Château Cheval Blanc ; localisation des placettes-terroir et des différents dispositifs d'étude de la température.....	24
Figure 7 : Intérieur d'un boîtier d'un capteur de température RLogger OrbiWise, équipé d'une sonde de température.....	28
Figure 8 : Intérieur d'un boîtier d'un capteur de température TinyTag Talk 2 équipé de deux sondes de température.	28
Figure 9 : Dispositif de comparaison de la station Météo-France (second plan) aux capteurs de température (premier plan) localisés à 120cm et 175cm.....	30
Figure 10 : Piquet de la parcelle 23 enherbée équipé de quatre capteurs de température à 30, 60, 90 et 120cm dans le cadre de l'étude du gradient thermique vertical.....	32
Figure 11 : Schéma du dispositif d'étude du gradient thermique vertical montrant la hauteur des différents capteurs ainsi que celle du fil porteur et de la zone des grappes	33
Figure 12 : Flétrissement des jeunes rameaux suite aux nuits de gel d'avril 2017.....	34
Figure 13 : Résultat de la "taille de nettoyage" ; à gauche la vigne nettoyée, à droite la vigne portant encore des rameaux nécrosés.	34
Figure 14 : Cep après la "taille de nettoyage".	36
Figure 15 : Hétérogénéité de la vitesse du débourrement de la seconde génération de rameaux au sein d'un même cep.....	36
Figure 16 : Hétérogénéité de la vitesse de véraison au sein d'un même cep porteur de rameaux de deuxième génération.....	38
Figure 17 : Hétérogénéité de la taille des grappes issues de rameaux de deuxième génération au sein d'un même cep.....	38
Figure 18 : Evolution de la température moyenne du 01 mars au 30 septembre de 1953 à 2016.	44
Figure 19 : Evolution des moyennes des températures maximales, moyennes et minimales de 1994 à 2016.	44
Figure 20 : Potentiel en anthocyanes moyen (mg/L) en fonction du rayonnement global (J/cm^2) des Cabernets francs de 2006 à 2014.....	44
Figure 21 : Ecart des valeurs de Tmax relevées par le capteur 107 et la station Météo-France au cours de l'année 2016.....	46
Figure 22 : Ecart des valeurs de Tmin relevées par le capteur 107 et la station Météo-France au cours de l'année 2016.....	46
Figure 23 : Indices de Winkler par hauteur (30, 60, 90 et 120cm) des parcelles 23 (enherbée) et 24 (labourée) sur l'année 2016.....	56

Figure 24 : Indices de Huglin par hauteur (30, 60, 90 et 120cm) des parcelles 23 (enherbée) et 24 (labourée) sur l'année 2016	56
Figure 25 : Moyenne de la Tmin par hauteur (30, 60, 90 et 120cm) des parcelles 23 (enherbée) et 24 (labourée) sur la saison végétative de l'année 2016	58
Figure 26 : Moyenne de la Tmin par hauteur (30, 60, 90 et 120cm) des parcelles 23 (enherbée) et 24 (labourée) sur l'été de l'année 2016	58
Figure 29 : Photo de deux yeux re-débourrant grâce à leurs bourgeons secondaires et tertiaires après avoir été re-taillés suite au gel	68
Figure 30 : Photo d'un rameau de 2ème génération porteur d'une grappe en formation.....	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les régions viticoles définies à partir de l'indice de Winkler (1962).....	14
Tableau 2 : Moyennes des Tmax, Tmoy et Tmin du 1er avril au 30 septembre et indices de Winkler et de Huglin (et indices Végétation) calculés à partir des données des capteurs installés sur l'ensemble du domaine, de 2013 à 2016.	50
Tableau 3 : Sommes thermiques atteintes aux dates de mi-débourrement, mi-floraison et mi-véraison de 3 parcelles de 1ère génération (1A, 12A et 27A) et de 3 parcelles de 2ème génération (20, 23, 24) et deltas de nombre de jours et de somme thermique entre les stades.	66

INTRODUCTION

La température est un facteur essentiel du développement de la vigne et a fait l'objet de diverses études afin de préciser et de modéliser ce lien.

Dans un contexte de changement climatique, les conséquences notamment du réchauffement de l'atmosphère sur la vigne remettent en question la viticulture traditionnelle : localisation des régions productrices, adaptation des cépages, modes de conduite...

Afin de pouvoir adapter la viticulture à ce nouveau contexte, des projets de recherche ont eu pour premier objectif de modéliser la température à échelle de plus en plus fine pour pouvoir par la suite proposer des voies d'adaptation correspondant au contexte local. C'est le cas du projet Life-AdviClim dont une des zones d'études est centrée sur le Libournais, où se trouve le Château Cheval Blanc.

Le Château Cheval Blanc est un domaine viticole historique de Saint-Emilion. La constance de son vignoble et du style de ses vins faisant son identité, le changement climatique est un réel enjeu et l'adaptation du vignoble est une problématique actuelle.

Siège de nombreux suivis et études, le vignoble du Château est équipé depuis 2013 de plusieurs capteurs de température afin d'en étudier l'évolution en divers points.

L'étude faisant l'objet de ce mémoire porte sur la mise en relation des données de température issues de ces capteurs avec des données agronomiques, notamment l'occurrence de stades repères du développement de la vigne.

Elle porte également sur l'analyse des données issues d'un dispositif d'étude du gradient thermique vertical.

Les capteurs présents sur le domaine ont de plus permis d'étudier l'évolution de la température au cours des nuits de gel d'avril 2017 ainsi que le développement d'une deuxième génération de rameaux.

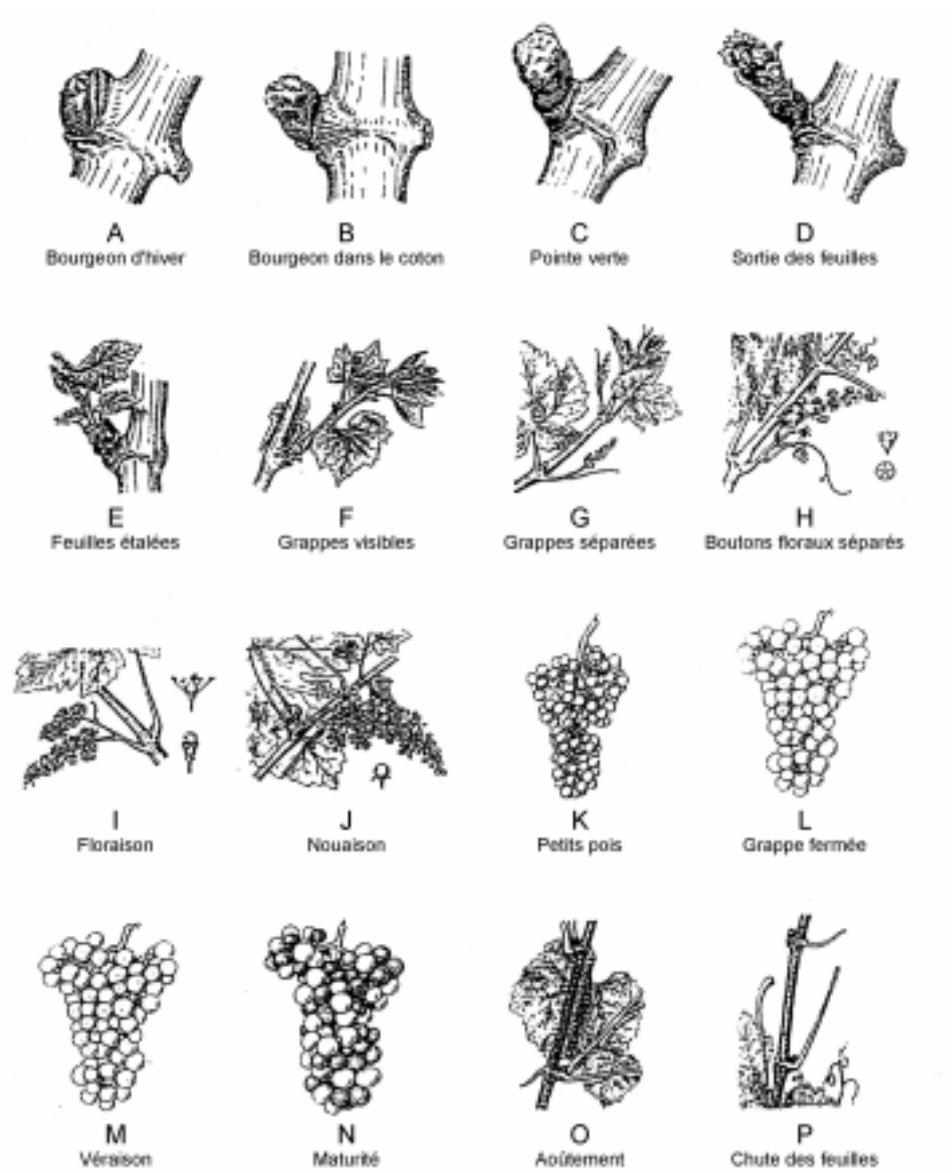


Figure 1 : Stades phénologiques de la vigne d'après Baggiolini (1952)

CADRE DE L'ETUDE

A - La relation vigne-température

1 - L'effet de la température sur le développement de la vigne

L'effet du climat et notamment de la température sur la vigne est sans conteste. C'est d'ailleurs cette relation étroite qui est à l'origine de ce que l'on appelle « l'effet millésime », terme permettant de traduire la variabilité interannuelle du vin due aux conditions climatiques (Quénol, 2014).

La température est un facteur majeur de la physiologie de la vigne (Cleland et al, 2007). Elle influence notamment sa phénologie, c'est-à-dire l'occurrence de stades repères de son développement (Jones & Davis, 2000) (cf Figure 1).

Parmi les différents stades phénologiques, trois sont particulièrement importants pour la description du cycle de la vigne : le débourrement, la floraison et la véraison (Jones & Davis, 2000 ; Duchêne et al, 2010 ; Parker et al, 2011). Le débourrement marque le début du cycle végétatif, la floraison le début du cycle reproducteur et la véraison marque le début du processus de maturation (Duchêne et al, 2010).

La date d'apparition de ces stades ainsi que la durée entre deux stades peut varier selon le cépage, le climat et la situation géographique (Jones & Davis, 2000 ; Duchêne et al, 2010 ; Parker et al, 2011).

Les températures extrêmes ont aussi de forts impacts sur le développement de la vigne, par exemple lorsque les températures deviennent inférieures à -2.5°C au printemps et causent le gel des bourgeons et des jeunes pousses, ou lorsque les grappes grillent quand la température dépasse 42°C (Madelin, 2004).

La température influe aussi sur la composition et la qualité des baies (Coombe, 1987). En effet, les températures et la durée de la maturation ont un effet sur le taux de sucres et d'acides (Jones & Davis, 2000), sur la quantité d'anthocyanes (Mori et al, 2007) et sur l'expression aromatique (Van Leeuwen & Seguin, 2006).

Etant une des composantes du climat, et ayant un impact fort sur le développement de la vigne, la température est aussi une des composantes du terroir, défini en 2010 par l'OIV comme « un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir collectif des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet espace. Le terroir inclut des caractéristiques spécifiques du sol, de la topographie, du climat, du paysage et de la biodiversité. ». C'est cette combinaison de facteurs qui fait la spécificité de chaque terroir, dont la quintessence est tirée lorsque le cépage est adapté aux conditions climatiques locales de sorte qu'il atteigne sa maturité à la fin de la saison végétative (Van Leeuwen & Seguin, 2006).

2 - Les indices bioclimatiques

Afin de pouvoir caractériser les climats de différentes régions viticoles ainsi que de caractériser leur variabilité climatique, différents indices bioclimatiques ont été définis,

Tableau 1 : Les régions viticoles définies à partir de l'indice de Winkler (1962)

Région	Somme des températures actives (en °C)	Exemples de stations
V	> 2205	Jerez (E), Palerme (I), Fresno (USA)
IV	1927-2205	Mendoza (Arg), Stellenbosch (RSA)
III	1650-1926	Montpellier (F), Milan (I), Porto (P), Napa (USA)
II	1389-1667	Côtes du Rhône (F), Santiago (Chili)
I	< 1371	Champagne (F), Dijon (F), Bordeaux (F)

notamment basés sur la température. C'est le cas de l'indice de Winkler, l'indice de Huglin, du modèle GFV (Grapevine Floraison Veraison model) et de l'indice de fraîcheur des nuits. Les trois premiers indices sont basés sur le calcul d'une somme thermique, c'est-à-dire le cumul sur une période donnée de la différence entre la température journalière et une valeur seuil.

L'indice de Winkler (Amerine & Winkler, 1944), est basé sur une température-seuil de 10°C, valeur considérée comme le zéro de végétation, c'est-à-dire la température minimale pour permettre le développement végétatif. Le cumul se fait du 1^{er} avril au 31 octobre en hémisphère Nord, soit la saison végétative.

Amerine et Winkler ont ensuite défini cinq classes de régions viticoles en fonction de la valeur de l'indice, la région I regroupant les zones avec les indices les plus faibles (<1371°C.d, degrés-jour) et la région V celles avec les indices les plus élevés (>2205°C.d) (cf Tableau 1).

$$WI = \sum_{01.04}^{31.10} (T_m - 10)$$

WI = Winkler Index [°C.days] ; Tm = Température moyenne

L'indice héliothermique de Huglin (Huglin, 1978) est également basé sur une température-seuil de 10°C, mais il donne plus d'importance aux températures maximales et prend en compte un coefficient de longueur du jour, dépendant de la latitude, pour intégrer le fait que plus les journées sont longues, plus l'activité photosynthétique est potentiellement importante. Pour Bordeaux, ce coefficient est de 1.04, et le climat est caractérisé comme « Tempéré » car ayant un indice de Huglin (HI) compris entre 1800 et 2100°C.d.

$$HI = \sum_{01.04}^{30.09} \left[\frac{(T_m - 10) + (T_x - 10)}{2} \right] \cdot K$$

HI = Huglin Index [°C.days] ; Tm = Température moyenne ; Tx = Température maximale ;
K = Coefficient de longueur du jour.

Le modèle GFV a été créé en 2011 par Parker *et al* afin de pouvoir modéliser les dates de floraison et de véraison par cépage et ainsi pouvoir comparer leur précocité. Contrairement aux deux indices précédents, cette somme thermique est basée sur une température-seuil de 0°C à partir du 60^{ème} jour de l'année en hémisphère Nord.

En 2013, Parker *et al* ont publié une liste des valeurs que devraient atteindre de nombreux cépages aux deux stades phénologiques en question selon le modèle GFV. Dans les cas du Merlot et du Cabernet franc les valeurs de F* sont respectivement de 1269 °C.d et 1245 °C.d pour la floraison, et de 2636 °C.d et 2692 °C.d respectivement pour la véraison, avec une erreur généralement inférieure à 1 semaine

Le dernier, l'indice de fraîcheur des nuits (Tonietto & Carbonneau, 2004), calculé comme la moyenne des températures minimales au cours du mois de septembre en hémisphère Nord, permet de caractériser une région en fonction des températures nocturnes lors de la maturation, celles-ci ayant une forte influence sur les métabolites secondaires, notamment les polyphénols et les arômes.

Ces indices et leurs classifications sont remis en question par le changement climatique (Quénol H. , 2014 ; Jones et al, 2005).

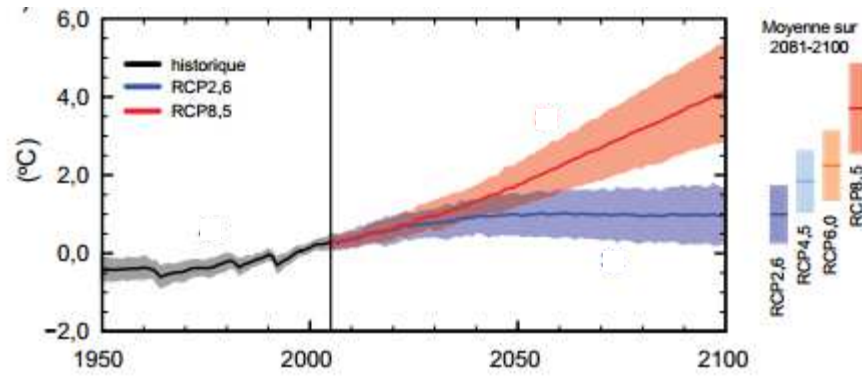
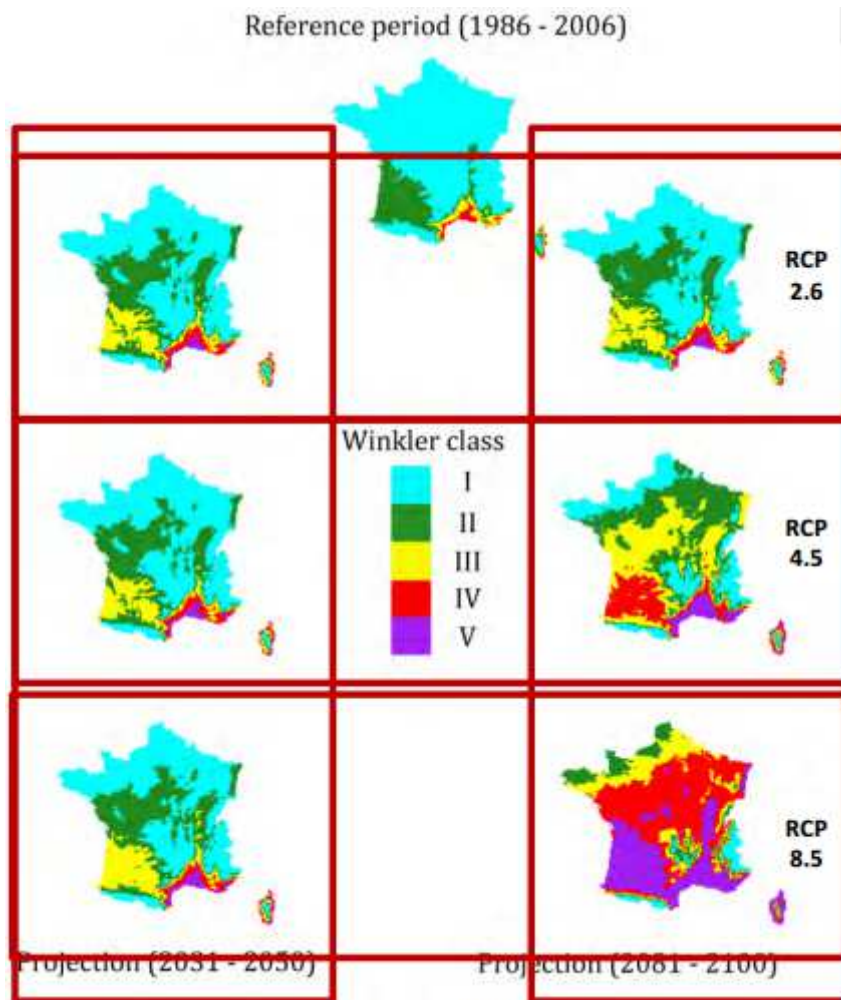


Figure 2 : Evolution de la température moyenne à la surface du globe de 1950 à l'horizon 2100 relativement à la période 1986-2005 selon les RCP2.6 et RCP8.5, et températures moyennes sur 2081-2100 pour les quatre RCP (GIEC 2013).



Source: Drias Project, Model ALADIN 9 km resolution

Figure 3 : Projections de la carte de France selon les régions viticoles définies par les indices de Winkler aux horizons 2031-2050 (à gauche) et 2081-2100 (à droite) selon les RCP2.6 (en haut), RCP4.5 (au milieu) et RCP8.5 (en bas), comparativement à la carte de la période de référence 1986-2006 (au milieu en haut).

B - Le changement climatique

1 - Les scénarii et les conséquences du réchauffement climatique

Le changement climatique est un phénomène en cours depuis les années 1750 et dû notamment aux émissions de gaz à effet de serre (GES), particulièrement le dioxyde de carbone (CO₂), du fait des activités humaines (forçage anthropique), ce qui a entraîné une absorption d'énergie par le système climatique. Ses conséquences climatiques et météorologiques sont observables depuis les années 1950 et se sont particulièrement accrues depuis la fin des années 1980, impliquant notamment la hausse de la température, une modification des précipitations et une hausse des rayons UV-B (GIEC 2013 ; GIEC 2014). Le forçage radiatif (FR), exprimé en W/m², permet de quantifier la force des facteurs qui modifient le bilan énergétique de la Terre ; un FR positif entraîne un réchauffement de la surface.

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), a défini 4 scénarii probables pour l'avenir, les RCP (Profils Représentatifs d'évolution des Concentrations), dépendant du niveau de forçage pour l'année 2100 relativement à la période de référence 1986-2005. Par exemple le RCP2.6 est le scénario qui induira un forçage de 2.6W/m² ; sur le même principe sont désignés les RCP4.5, RCP 6.0 et RCP8.5 (cf Figure 3). Ces scénarii représentent une diversité de politiques climatiques au cours du XXI^{ème} siècle :

- Le RCP2.6 correspond à un niveau de forçage très bas qui conduirait à une augmentation de la température de 0.3 à 1.7°C.
- Les RCP4.5 et RCP6.0 à des scénarii de stabilisation, entraînant une augmentation de la température de 1.1 à 3.1°C.
- Le RCP8.5 correspond à un scénario aux émissions de gaz à effet de serre très élevé, entraînant une augmentation de la température de 2.6 à 4.8°C d'ici 2100.

Il précise par ailleurs que les vagues de chaleur seront probablement plus fréquentes et longues et que des extrêmes froids pourront continuer à survenir en hiver.

Sur le terrain, cette augmentation de la température a déjà été observée, comme par Duchêne et Schneider (2005) qui ont noté une augmentation de la température moyenne d'environ 0.06°C par an en Alsace.

Quel que soit le scénario, la température va augmenter, et ceci n'est pas sans conséquences sur la vigne.

Comme nous l'avons vu, la physiologie de la vigne dépend de la température. Du fait du réchauffement climatique, l'ensemble du cycle phénologique est avancé et, d'ici la fin du XXI^{ème} siècle, il le sera de 20 à 40 jours à Bordeaux (Pieri, 2007-2010 ; Keller, 2010). Non seulement le cycle commence plus tôt, mais les durées entre stades phénologiques ont raccourci (Duchêne & Schneider, 2005 ; Sadras & Petrie, 2011). Cela signifie donc une maturation dans des conditions plus chaudes et sèches (Duchêne & Schneider, 2005 ; Pieri, 2007-2010) ainsi que des vendanges dès mi-août. Or ces conditions ne sont pas favorables à la production de vins de qualité (Van Leeuwen & Seguin, 2006 ; Van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017).

En effet, l'augmentation de la température favorise la production de baies moins équilibrées, enrichies en sucres et appauvries en acides organiques, ce qui a pour conséquence une augmentation du pH (Quénol, 2014 ; Van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017), bien que la température ne soit pas le seul facteur responsable de ces variations (Sadras et al, 2013 ; Quénol, 2014 ; Martínez-Lüscher et al, 2015). Elle empêcherait aussi une bonne accumulation des anthocyanes (Mori et al, 2007) et réduirait l'expression aromatique des vins produits (Van Leeuwen & Seguin, 2006).

De nombreuses études, se basant sur les modèles prévisionnels d'augmentation de la température ainsi que sur les indices bioclimatiques, remettent en question la viabilité de certaines régions viticoles historiques, soit parce qu'elles ne seront plus aptes à la production viticole, soit parce que les cépages traditionnels n'y seront plus adaptés (Jones et al, 2005 ; Hall & Jones, 2009 ; Hannah et al, 2013). Cependant, dans une réponse aux résultats alarmants de Hannah *et al* (2013), Van Leeuwen *et al* (2013) rappellent qu'il est primordial de ne pas oublier le facteur humain, car les goûts des consommateurs évoluent et les viticulteurs peuvent mettre en œuvre des stratégies d'adaptation.

2 - La nécessité de s'adapter

Dans ce contexte, dans son rapport de 2014 le GIEC propose deux solutions complémentaires : l'atténuation, consistant à réduire les émissions de GES pour améliorer les perspectives climatiques ; et l'adaptation, afin de réduire les risques d'incidence dus au changement climatique. Néanmoins la durabilité de l'efficacité de l'adaptation est limitée par l'ampleur et l'inertie du changement climatique (GIEC 2014).

Face à la nécessité pour les viticulteurs de s'adapter au changement climatique, quatre scénarii ont été développés lors du projet LACCAVE (Long-term Adaptation to Climate Change in Viticulture and Enology) correspondant à quatre stratégies possibles de la part de la filière (Ollat & Touzard, 2013 ; Ollat et al, 2016) :

- La stratégie « conservatrice », qui n'implique que de faibles efforts pour s'adapter.
- La stratégie « innover pour rester », qui implique des innovations techniques pour adapter le vignoble aux nouvelles conditions climatiques.
- La stratégie « nomade », qui consiste à délocaliser le vignoble vers une région mieux adaptée climatiquement parlant.
- La stratégie « libérale », impliquant à la fois déterritorialisation et industrialisation.

Si l'on s'intéresse à la stratégie innovatrice, les buts sont multiples : maintenir les rendements et la typicité (Ollat & Touzard, 2014), tout en adaptant la phénologie de la vigne au changement climatique (Duchêne et al, 2010 ; Neethling, 2016 ; Van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017), ceci en prenant en compte l'évolution des préférences des consommateurs (Ollat et al, 2016). L'adaptation est donc une problématique à échelle locale (Füssel, 2007) et les innovations doivent s'inscrire dans le cadre réglementaire (Ollat et al, 2016) dont la filière, qui a tendance à se projeter sur du court-terme, attend désormais une évolution et un encadrement pour organiser l'adaptation sur le long-terme (Neethling et al, 2017).

On peut envisager deux voies d'adaptations (Van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017) :

- Une modification du matériel végétal, en choisissant un porte-greffe, un cépage et un clone adaptés aux conditions climatiques actuelles et futures. Cette voie a l'avantage de ne pas impliquer de coûts supplémentaires et de réduire les impacts environnementaux (Van Leeuwen & Darriet, 2016). Elle sera sûrement à l'origine de la création de nouveaux cépages plus tardifs (Duchêne et al, 2010).
- Une modification des techniques culturales afin de retarder la maturité, comme :
 - La taille tardive (Van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017) ; tailler la vigne au moment du débourrement des bourgeons apicaux permettrait de retarder l'ensemble du cycle ainsi que de favoriser la floraison et la nouaison (Friend & Trought, 2007).
 - L'augmentation de la hauteur du tronc, car la température du jour est plus élevée proche du sol (Reynolds & Heuvel, 2009 ; Oke, 1978).

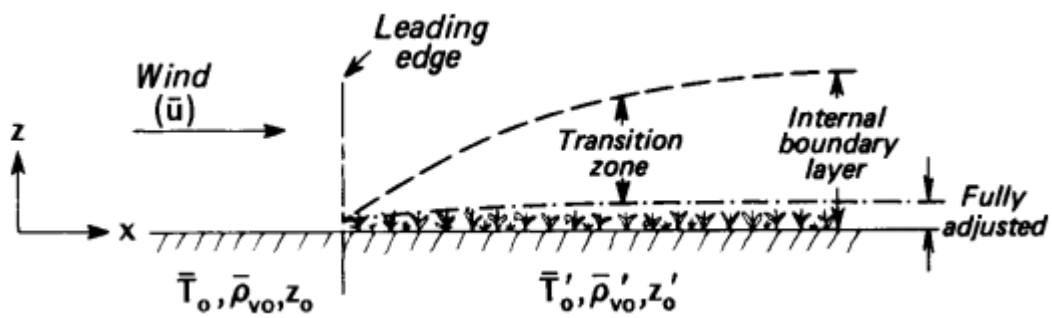


Figure 4 : Modifications des caractéristiques (température T_0 , densité de la vapeur d'eau ρ_0 et altitude z_0) de la couche limite au passage d'une surface nue, lisse et sèche à une surface végétalisée et donc plus rugueuse, fraîche et humide.

- La réduction du rapport feuille/fruit, mais ceci au détriment de la qualité des baies (Van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017).
- L'avancée de la récolte ; bien qu'elle ne retarde pas la maturité cette méthode permet de rééquilibrer le taux sucres/acides (Van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017).
- La gestion du sol et de la vigueur (Neethling, 2016).

Ces différentes adaptations peuvent être cumulées afin de favoriser le recul de la maturité (Neethling, 2016 ; Van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017).

Comme nous l'avons dit, l'adaptation est une problématique locale. Pour déterminer comment s'adapter, il faut donc connaître le contexte et notamment le climat local.

C - L'étude du climat local

1 - Variabilité spatio-temporelle de la température

La température varie temporellement, en fonction de l'heure, de la date, du type de temps (humidité, rayonnement solaire, nébulosité, vent...), mais aussi spatialement, en fonction de nombreux facteurs comme la latitude, l'altitude, le relief, l'environnement (végétation, proximité de bâtiments, de masses d'eau...) (Oke, 1978 ; Madelin, 2004 ; Reynolds & Heuvel, 2009 ; Legault, 2014 ; Neethling, 2016).

Par exemple si l'on s'intéresse à la couche de l'atmosphère la plus proche du sol, en l'absence de vent et de nuages on peut observer un gradient thermique vertical : le jour la température est plus chaude au niveau du sol (chauffé par le soleil) et décroît avec l'altitude ; la nuit en revanche ce gradient s'inverse car la surface du sol se refroidit plus vite que l'atmosphère, on parle d'inversion thermique (Oke, 1978 ; Madelin, 2004 ; Neethling, 2016)

Mais ce schéma peut être bouleversé par la rugosité du terrain (l'intensité des fluctuations locales d'altitude) qui impacte le brassage de l'air et donc le gradient thermique, ainsi que par la météorologie du jour (Legault, 2014 ; Neethling, 2016). La végétation aussi impacte fortement la température du fait de sa transpiration et de son architecture qui modifient la circulation des masses d'air (Oke, 1978 ; Reynolds & Heuvel, 2009).

Dans l'optique du changement climatique, afin de pouvoir faire des projections dans le but de prévoir l'adaptation, il est nécessaire de déterminer quels facteurs sont les plus déterminants dans la variabilité de la température.

2 - Notion d'échelles

Afin de déterminer les facteurs principaux de variabilité de la température, il faut d'abord déterminer à quelle échelle on observe ses variations. Trois niveaux d'échelles du climat sont généralement utilisés (Oke, 1978 ; Madelin, 2004) :

- Le macroclimat, de 100km à 10⁵km, correspond au climat régional, principalement influencé par sa position géographique.
- Le mésoclimat, de 1km à 100km, correspond au climat local, ou topoclimat, principalement influencé par la topographie. C'est l'échelle utilisée pour caractériser les grands types de régions viticoles comme dans le cas des classifications de Winkler (1944) et de Huglin (1978), ainsi que pour les projections climatiques telles que les RCP.
- Le microclimat, de 1cm à 1km, correspond à l'échelle la plus fine, adaptée à l'étude de la parcelle et de la plante.

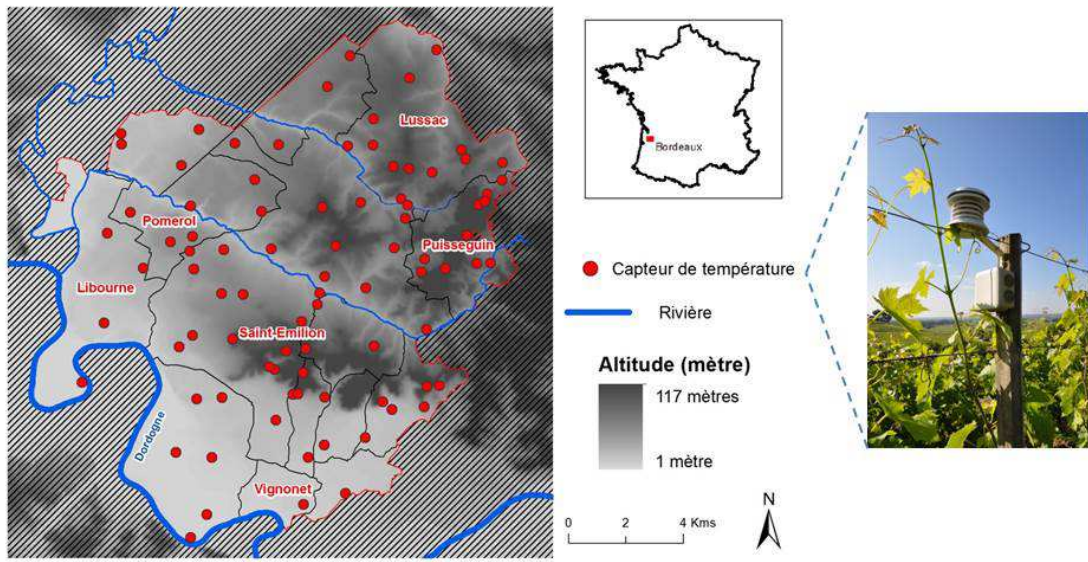


Figure 5 : Répartition des 90 capteurs de température du projet Life-AdviClim sur le Libournais

Ces échelles sont évidemment imbriquées, les conditions des échelles larges se répercutant sur les plus petites échelles (Quénol, 2014 ; Neethling, 2016).

Pour affiner les résultats des modèles globaux tels que les RCP, de nombreux travaux ont cherché à déterminer des RCM, modèles régionaux de circulation de l'atmosphère, combinés à des modèles statistiques afin de prendre en compte des facteurs comme la topographie, la végétation et l'hydrographie (Neethling, 2016). Ils ont notamment permis de mettre en évidence que la variabilité à méso-échelle de la température était souvent supérieure à celle prédite par les modèles globaux (Quénol, 2014 ; Neethling, 2016).

Le climat peut désormais être modélisé avec une résolution de l'ordre de quelques kilomètres. Toutefois cette échelle reste trop large pour prendre en compte les simulations du fonctionnement écophysologique de la vigne dont les dimensions sont de l'ordre de la parcelle (Quénol, 2014).

Des études à échelle fine sont donc nécessaires pour modéliser le climat à l'échelle du terroir.

3 - Des projets à échelle fine

Plusieurs programmes de recherches se sont succédés depuis 2008 afin de mettre en place une méthodologie de mesures météorologiques et agronomiques et de modéliser le climat à l'échelle du terroir dans le but de pouvoir simuler l'évolution du climat à échelle fine et ainsi pouvoir prévoir des scénarii d'adaptation.

D'abord le projet ANR-TERVICLIM « Observation et modélisation spatiale du climat des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique » (2008-2012), puis le projet GICC-TERADCLIM « Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles » (2011-2013), le projet LACCAVE « Adaptation à long terme au changement climatique pour la viticulture et l'œnologie » (2012-2015) et aujourd'hui le projet Life-ADVICLIM « Observations à haute résolution des scénarios d'adaptation pour la vitiviniculture » (2014-2019) (Quénol et al, 2010 ; Quénol, 2014 ; Le Roux et al, 2016).

Ils se basent notamment sur l'utilisation de stations météorologiques et de capteurs de température afin de pouvoir déterminer des modèles dynamiques et géostatistiques.

Le programme Life-ADVICLIM, en cours actuellement, est un projet européen dont le but est de développer un nouvel outil d'aide à la décision pour les viticulteurs : « un réseau de mesures et une plateforme web qui permettent aux viticulteurs d'évaluer les impacts du changement climatique sur leurs parcelles, de simuler des scénarii d'adaptation et de mesurer les émissions de gaz à effet de serre liées à leurs pratiques » (ADVICLIM).

Cinq vignobles européens sont équipés de ce type de réseau de mesures, le plus dense étant celui du Libournais, avec 90 capteurs de température (1 pour 240ha) et 37 stations météorologiques répartis sur les communes de Pomerol, de Saint-Emilion et de leurs satellites, ainsi que 18 parcelles de références plantées en Merlot afin d'étudier l'impact de la température sur le développement de la vigne, sur les deux stades phénologiques du modèle GFV ainsi que sur les dynamiques de maturation.

Les premiers résultats mettent en évidence une variabilité spatiale au sein de la zone d'étude avec de fortes amplitudes thermiques (ADVICLIM).

C'est dans cette zone d'étude qu'est localisé le Château Cheval Blanc, un domaine historique soucieux de préserver son style séculaire au moyen de ces nouvelles technologies.

DOMAINE CHÂTEAU CHEVAL BLANC Saint-Émilion

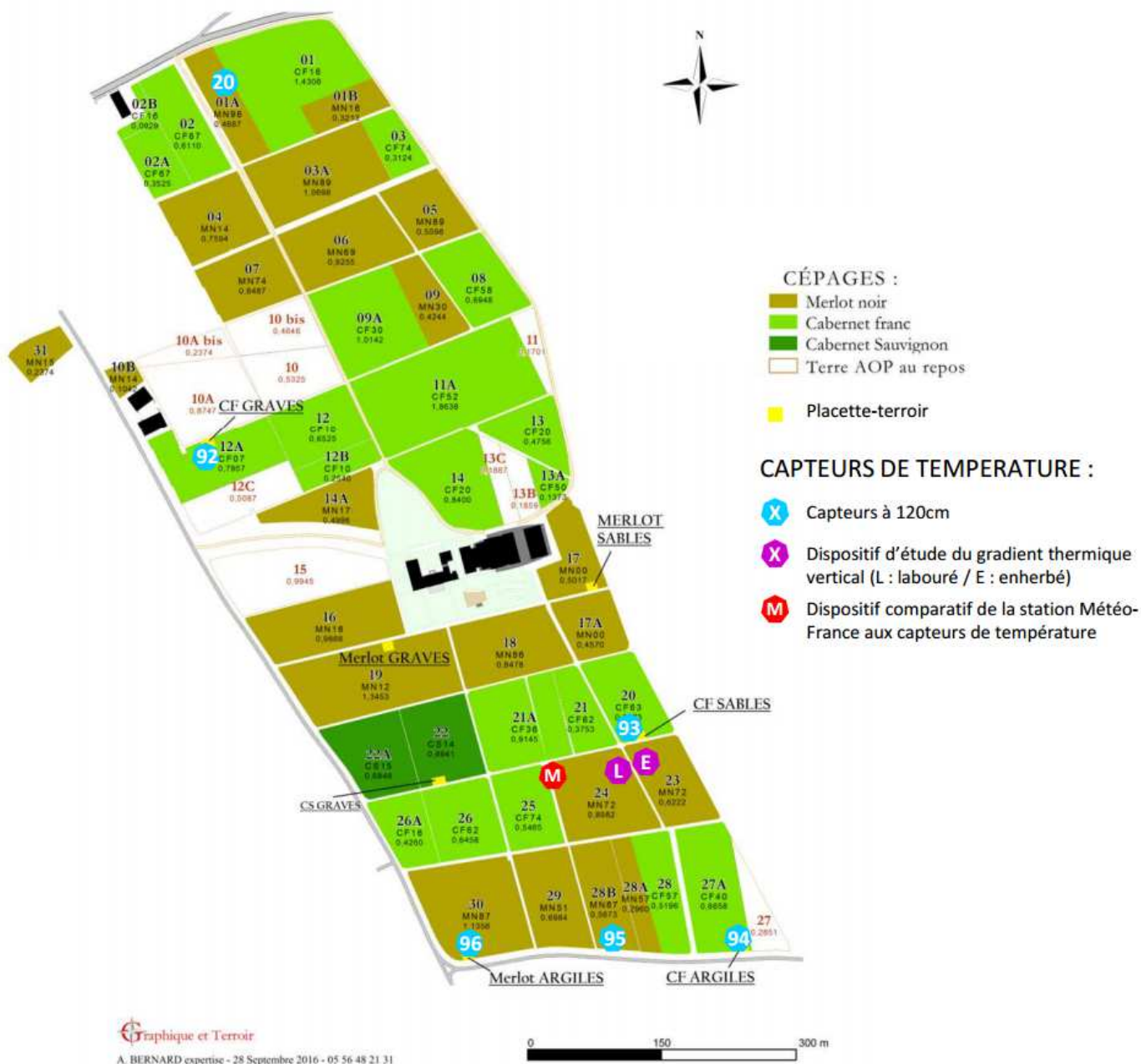


Figure 6 : Parcelaire du domaine Château Cheval Blanc ; localisation des placettes-terroir et des différents dispositifs d'étude de la température

D - L'étude de la température au Château Cheval Blanc

1 - Les enjeux pour un domaine historique

Le Château Cheval Blanc est un domaine viticole emblématique de l'appellation Saint-Emilion, classé « Premier Grand Cru Classé A » depuis 1954. Il se distingue par sa constance, à la fois dans le style et la qualité de son vin, mais aussi dans la gestion de son vignoble, ce qui fait sa force et son identité.

Les premiers témoignages de la culture de la vigne à Cheval Blanc remontent au XVème siècle. Le domaine présente la même configuration parcellaire depuis 1871 et son encépagement est resté presque inchangé depuis 1911, composé de 49% de Cabernet franc, de 47% de Merlot et de 4% de Cabernet Sauvignon (cf Figure 6).

Localisé sur des alluvions quaternaires de l'Isle et des dépôts de l'Oligocène, le domaine bénéficie d'une variété de textures de sols : aussi bien des sables que des argiles et des graves, autant de combinaisons possibles avec les cépages qui y sont cultivés.

Aujourd'hui Cheval Blanc couvre 39 hectares d'un seul tenant, subdivisés en 45 parcelles chacune ayant été étudiée pour trouver la meilleure combinaison entre le sol, le porte-greffe et le cépage, ainsi que l'itinéraire technique (notamment enherbement ou non) qui lui est le mieux adapté.

Ces associations sont le fruit de diverses études menées sur le terrain et la recherche continue encore aujourd'hui notamment au travers des sept « placettes-terroir », petites portions de parcelles sélectionnées pour leur représentativité de la combinaison sol-cépage (cf Figure 6), sur lesquelles sont menés de nombreux essais et suivis (Finger, 2015).

Bien au fait que le changement climatique est un enjeu majeur pour la viticulture, le Château Cheval Blanc s'est tourné vers la recherche pour étudier finement son climat et trouver des voies d'adaptation afin de préserver son identité séculaire.

2 - Plusieurs échelles de suivis au sein d'un même domaine

Afin de guider au mieux ses choix techniques, le Château Cheval Blanc s'est doté depuis quelques années déjà d'une station météorologique Météo-France. Les informations tirées de cette station sont très utiles pour la gestion quotidienne des travaux viticoles ainsi que pour caractériser le millésime. En revanche elles ne permettent pas de modélisation fine de la température.

En 2013, avant même que ne démarre le programme de recherches Life-ADVICLIM, les placettes-terroir de Cheval Blanc ont été équipées de capteurs afin d'étudier les variations de température en fonction du type de sol et du cépage, l'altitude du vignoble étant considérée comme constante. Ce dispositif apporte des informations de température qui peuvent être mises en parallèle avec les observations agronomiques et les suivis menés sur ces placettes.

Le lancement du programme en 2014 a permis d'automatiser ces capteurs qui étaient alors manuels. Ce projet permettra aux décideurs techniques de disposer d'informations climatiques à échelle fine avec une résolution de 25m.

Depuis 2016, un autre type de dispositif a été mis en place dans le but d'étudier le gradient thermique vertical et l'effet du travail du sol sur la température, afin de pouvoir déterminer si ces deux facteurs, peu impactant sur le vin produit, peuvent être des voies d'adaptation pour Cheval Blanc dans le cadre du réchauffement climatique.

3 - Les objectifs de cette étude

C'est dans ce contexte qu'a été proposé ce sujet d'étude, afin de mettre en relief les données thermiques recensées par les différents dispositifs présents sur le domaine de Cheval Blanc.

Etant donné la masse d'informations à disposition, les objectifs étaient multiples :

- Etudier les données collectées par la station Météo-France pour déterminer la tendance générale de l'évolution de la température sur le domaine depuis 1993.
- Comparer les données collectées par la station Météo-France à celles collectées par les capteurs afin de déterminer les écarts entre les températures relevées dans la végétation et les températures enregistrées par une station météo classique.
- Utiliser les informations du réseau de capteurs présents sur le domaine pour étudier un éventuel impact du type de sol, des covariables environnementales (altitude, pente, exposition) et du type de temps sur la température.
- Profiter des suivis réalisés sur les placettes-terroir pour tester le modèle GFV à Cheval Blanc, ainsi que déterminer s'il existe un effet de la température sur la dynamique de la maturation des baies.
- Compiler et étudier les données du dispositif permettant d'étudier le gradient thermique vertical afin de déterminer à la fois l'impact du travail du sol sur la température ainsi que d'évaluer si l'augmentation de la hauteur du tronc serait une voie suffisante et envisageable pour décaler la maturité, dans une optique d'adaptation au réchauffement climatique. Mettre en évidence les jours d'inversion thermique et les mettre en relation avec le type de temps.

Ces résultats devaient permettre de proposer une amélioration de l'organisation du réseau de capteur, afin notamment de l'automatiser.

Il est à préciser que l'année 2017 est une année particulière pour Cheval Blanc. En effet, il y a eu deux vagues de gel en avril, qui ont provoqué de sévères dégâts sur de nombreuses parcelles. La décision a été prise de tailler les parties herbacées gelées. Il y eut donc 3 types de cas :

- Soit l'intégralité du rameau était indemne, dans ce cas on le ne touchait pas.
- Soit l'apex était gelé mais pas les grappes, auquel cas on coupait les apex pour que les rameaux secondaires prennent le relais de la croissance.
- Soit les grappes étaient gelées. Dans ce cas le rameau était taillé à la couronne afin de favoriser le débourrement des deuxièmes et troisièmes bourgeons d'hiver, potentiellement fructifères.

Les deuxièmes et troisièmes bourgeons ont effectivement été fructifères, bien que dans une moindre mesure que les primaires. De fait, deux « générations » de grappes se sont développées simultanément, la « première génération » suivant une chronologie classique, la « deuxième génération » ayant un cycle décalé dans le temps, et donc se déroulant dans des conditions plus chaudes.

Il se trouve que certains capteurs de température se situent dans des zones restées intactes ou bien ayant été intégralement gelées. De nouveaux objectifs ont donc émergé :

- L'étude de la variabilité de la température lors des nuits de gel sur l'ensemble du domaine.
- L'étude du gradient thermique vertical lors de ces nuits
- La comparaison de la phénologie des deux générations de rameaux, celle issue des bourgeons primaires et celle issue des bourgeons secondaires.
- L'étude de l'adéquation de la deuxième génération au modèle GFV.



Figure 8 : Intérieur d'un boîtier d'un capteur de température TinyTag Talk 2 équipé de deux sondes de température.



Figure 7 : Intérieur d'un boîtier d'un capteur de température RLogger OrbiWise, équipé d'une sonde de température.

MATERIELS ET METHODES

A - Les dispositifs de suivi de la température

1 - Les appareils de mesure de la température

a. La station Météo-France

Une station de surface Météo-France est installée depuis 2006 au sein du domaine de Cheval Blanc. Elle relève de façon horaire diverses informations : la pluviométrie, la vitesse et la direction du vent, le rayonnement global, l'humidité ainsi que la température minimale et la température maximale.

Les températures minimales et maximales sont perçues par une sonde thermique à environ 175cm du sol, dans un abri antiradiation. Cet abri est ventilé naturellement afin que l'air autour du capteur soit en permanence renouvelé et donc que le capteur soit réactif aux conditions changeantes.

Les données ont été compilées et informatisées afin de recenser les valeurs quotidiennes. Elles servent notamment au calcul des indices bioclimatiques qui sont basés sur les températures relevées par ce type de dispositif.

b. Les capteurs de température

Trente-trois capteurs de température ont été installés sur le vignoble de Château Cheval Blanc. Ils sont tous composés d'une ou deux sondes de température logées dans un abri antiradiations de type RS3 (Prosensor ou Onset HOBO) et reliées à un boîtier hermétique contenant un logger, un système de récupération et d'enregistrement des données.

Il y a deux types de loggers sur le domaine : les loggers Tinytag Talk 2 (Gemini Data Loggers Ltd., cf Figure 7) et les RLoggers de la marque OrbiWise (cf Figure 8).

Les Tinytag Talk 2 sont ce que nous appellerons des capteurs « manuels » car ils stockent les données qui doivent être relevées manuellement en connectant un ordinateur au boîtier de stockage via un câble USB. Ils sont réglés pour enregistrer à chaque heure pleine la valeur de température minimale et de température maximale de l'heure écoulée.

Les RLoggers OrbiWise sont ce que nous appellerons des capteurs « automatiques » car ils sont équipés de la technologie LoRa® : les loggers enregistrent les données puis les transmettent par ondes radio vers une antenne relai qui, via une connexion GSM, les envoie sur un serveur informatique. Les données sont ensuite mises en ligne sur une plateforme Web. Les données relevées sont aussi les températures minimales et maximales mais cette fois sur un pas de temps d'un quart d'heure.



Figure 9 : Dispositif de comparaison de la station Météo-France (second plan) aux capteurs de température (premier plan) localisés à 120cm et 175cm.

Pour respecter le protocole des études utilisant ce type de capteurs, comme le programme Life-ADVICLIM, les capteurs présents sur Cheval Blanc ont été installés sur des piquets en bois à 120cm du sol et orientés vers le Nord.

Ces capteurs nécessitent un entretien assidu afin de s'assurer de leur bon fonctionnement. Par exemple il faut vérifier que les capteurs ne sont pas noyés dans la végétation, que les boîtiers sont bien étanches et que les sondes de températures ne touchent ni la paroi intérieure de l'abri solaire ni ne se touchent entre elles.

2 - Les dispositifs mis en place

a. Le dispositif pour la comparaison entre la station Météo-France et les capteurs de température

Au niveau de la station Météo-France, trois capteurs de température ont été installés dans le but de pouvoir déterminer la relation entre les valeurs relevées par la station Météo-France et celles relevées par les capteurs. L'objectif de ce dispositif est de déterminer la représentativité des indices bioclimatiques calculés à partir des valeurs relevées par les capteurs de température par rapport à ceux calculés à partir des données d'une station météo classique.

Depuis janvier 2016 un capteur a été installé dans une parcelle voisine, à moins de 5m de la station. C'est donc un capteur à 120cm du sol et dans la végétation, comme l'ensemble des autres capteurs. Un premier lien pouvait être établi entre les modalités « 175cm - Météo-France - Dégagé » et « 120cm - Capteur - Végétation », selon la hauteur, le système de mesure de la température et l'environnement du capteur (la station Météo-France étant dans une zone dégagée). Mais de fait, trois facteurs variaient en même temps.

Afin de pouvoir expliquer les écarts entre les deux séries obtenues, deux nouveaux capteurs ont été installés en juillet 2017, dans la zone dégagée de la station Météo-France : un capteur à 120cm et un capteur à 175cm. Les deux nouvelles modalités sont donc « 120cm – Capteur – Dégagé » et « 175cm – Capteur – Dégagé » (cf Figure 9). Il n'est pas possible de réaliser les 4 autres combinaisons de facteurs puisque l'on ne peut pas installer un capteur Météo-France à 120cm et/ou dans la végétation et que l'on ne peut pas installer de capteur à 175cm dans la végétation.

b. Le réseau de capteurs sur l'ensemble du domaine

Cinq parcelles de Cheval Blanc sont équipées de capteurs automatiques faisant partie du réseau du programme ADVICLIM. Il s'agit des parcelles 1A, 20, 27A, 28 et 30. Ces parcelles ont été choisies pour leur diversité de facteurs comme le sol, le cépage, l'enherbement, l'altitude... Certains de ces capteurs sont localisés au niveau des placettes-terroir du domaine.

Dans le but de réaliser un suivi précis et continu de la relation sol-cépage, sept placettes-terroir ont été définies sur l'ensemble du vignoble pour leur représentativité. Ce sont des petites zones balisées en bordure de parcelle dans le sens du rang, comprenant généralement 8-10 rangs consécutifs pour une profondeur d'une vingtaine de pieds. Il y en a une par combinaison sol-cépage effective sur le domaine : Merlot-Graves (MG, parcelle 19), Merlot-Sables (MS, parcelle 17), Merlot-Argiles (MA, parcelle 30), Cabernet franc-Graves (CFG, parcelle 12A), Cabernet franc-Sables (CFS, parcelle 20), Cabernet-franc-Argiles (CFA, parcelle 27A) et Cabernet Sauvignon-Graves (CSG, parcelle 22).



Figure 10 : Piquet de la parcelle 23 enherbée équipé de quatre capteurs de température à 30, 60, 90 et 120cm dans le cadre de l'étude du gradient thermique vertical

Il était initialement prévu que les placettes-terroir soient équipées d'un capteur de température. Or la localisation des placettes a parfois été modifiée du fait des arrachages de certaines parcelles, et les capteurs n'ont pas toujours suivi. Aujourd'hui, seules les placettes MA, CFG et CFA sont encore équipées de capteurs.

Si l'on ne considère ni le dispositif autour de la station Météo-France ni le dispositif d'étude du gradient vertical présenté ci-après, le « réseau » du domaine comprend 6 capteurs à 120cm, dont 1 manuel (celui de la parcelle 12A), 2 équipés des deux systèmes automatiques et manuels (parcelle 1A et parcelle 20) et 3 automatiques (parcelles 27A, 29 et 30).

Si l'on considère aussi les capteurs à 120cm des autres dispositifs (tous manuels) le réseau comprend alors 14 capteurs.

c. Le dispositif d'étude du gradient vertical

En décembre 2015, un nouveau dispositif a été mis en place afin de pouvoir étudier l'effet de la hauteur et du travail du sol sur la température.

Afin d'étudier l'effet du travail du sol, en l'occurrence comparer les modalités enherbé/labouré, deux parcelles voisines ont été sélectionnées avec pour seule différence l'une ou l'autre de ces modalités. Il s'agit des parcelles 23 et 24, plantées la même année (1972) sur le même type de sol (Sablo-argileux) avec le même matériel végétal (Merlot sur SO4 et 5BB), la même densité (6000 pieds/ha) et entretenues par les mêmes ouvriers. La parcelle 24 est labourée et la parcelle 23 est enherbée depuis 2007 (enherbement naturel) ; les opérations culturales réalisées sur chacune sont enregistrées.

Dans ces parcelles, tout comme dans le reste du domaine, le fil porteur est à environ 45cm du sol et les grappes se situent entre 30 et 60cm (cf Figure 11).

Dans chacune des deux parcelles, trois piquets sont chacun équipés de 4 capteurs sur leur face Nord, à 30cm, 60cm, 90cm et 120cm du sol. Les piquets ont été choisis pour être proches afin de limiter les possibles différences d'altitude ; ils devaient aussi présenter une face Nord plate afin de pouvoir y fixer les capteurs, qui sont tous manuels.

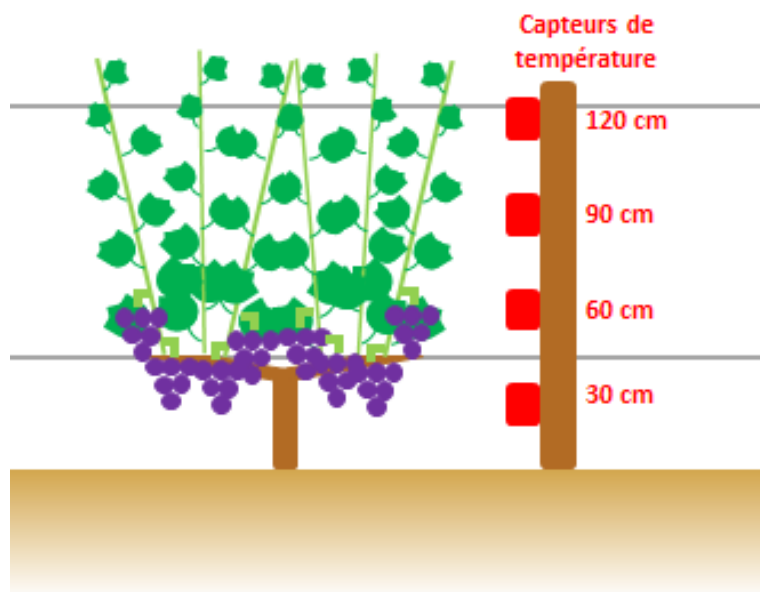


Figure 11 : Schéma du dispositif d'étude du gradient thermique vertical montrant la hauteur des différents capteurs ainsi que celle du fil porteur et de la zone des grappes



Figure 12 : Flétrissement des jeunes rameaux suite aux nuits de gel d'avril 2017.



Figure 13 : Résultat de la "taille de nettoyage" ; à gauche la vigne nettoyée, à droite la vigne portant encore des rameaux nécrosés.

B - Les suivis agronomiques

1 - La réponse de la vigne aux températures extrêmes

a. Le gel

Le gel peut avoir un impact très fort sur le développement de la vigne puisqu'il peut conduire à la nécrose de certains organes. C'est notamment ce qu'il s'est passé en avril 2017. A une semaine d'intervalle, deux vagues de gel de deux nuits successives ont mis à mal les vignes de Cheval Blanc.

La nuit la plus sévère a été celle du 27 avril. De la même façon que cela s'était déjà produit 26 ans auparavant, une coulée de gel a englouti la vigne qui avait déjà produit des rameaux de presque 50cm, porteurs d'inflorescences en formation. Au dégel le lendemain matin, les apex étaient déjà retombants et la végétation s'assombrissait (cf Figure 12).

Après avoir fait des estimations de perte, il a été décidé de couper les parties nécrosées en comptant sur le débourrement des bourgeons secondaires et tertiaires, contrairement aux préconisations. Dans chaque parcelle « nettoyée », un rang localisé au milieu de la parcelle n'a pas été taillé pour comparer l'évolution de la vigne selon les deux méthodes et des comptages ont été faits pour suivre le re-débourrement dans les deux cas (cf Figures 13 et 14).

b. L'échaudage

Cette année, de fortes chaleurs ont provoqué de l'échaudage sur de nombreuses grappes. Bien qu'il ait été constaté, aucun suivi n'a été fait ; il n'est donc pas possible de mettre en relation l'apparition de ce phénomène avec les températures à des dates précises.

2 - La phénologie

a. Les stades relevés

Afin de suivre l'évolution du développement de la vigne et se rendre compte de sa précocité, 3 stades font l'objet d'un suivi précis au niveau des placettes-terroir : le débourrement, la floraison et la véraison.

Pour le débourrement et la floraison, le comptage se fait sur 20 pieds (5 sur 4 rangs) qui ne sont ni trop jeunes (au moins 10 ans) ni malades. Quand les observations montrent que l'on approche d'un de ces stades, un comptage est réalisé tous les 2-3 jours.

On considère qu'un bourgeon est débourré lorsque qu'il atteint le stade C de l'échelle de Baggiolini c'est-à-dire que l'on observe une petite pointe verte ou rouge. Au niveau d'un pied, le nombre d'yeux laissés à la taille et le nombre de bourgeons débourrés sont relevés. Le pourcentage d'avancement du débourrement de la placette correspond au nombre total de bourgeons débourrés par rapport au nombre total d'yeux francs laissés à la taille.

Pour la floraison, une estimation visuelle du pourcentage de fleurs ouvertes sur la totalité du nombre de fleurs portées par le pied renseigne de son état d'avancement. La moyenne des pourcentages des 20 pieds donne le pourcentage d'avancement de la floraison sur la placette.

On considère que la placette a débourré ou fleuri lorsque le pourcentage calculé atteint 50% ; les comptages doivent donc continuer jusqu'à avoir atteint ou dépassé cette valeur. La date exacte du mi-débourrement ou de la mi-floraison est ensuite calculée au prorata entre les deux dates dont les valeurs de pourcentage encadrent 50%.



Figure 14 : Cep après la "taille de nettoyage".



Figure 15 : Hétérogénéité de la vitesse du débournement de la seconde génération de rameaux au sein d'un même cep.

Pour le suivi de la véraison, dès que les premières baies commencent à se colorer, 200 baies environ sont récoltées de manière aléatoire, par bouquets de 5 baies sur l'ensemble de chaque placette-terroir. Les baies sont ensuite équeutées, comptées et pesées. On compte le nombre total de baies ainsi que le nombre de baies qui ont commencé à changer de couleur. Le pourcentage de baies colorées par rapport au nombre total de baies renseigne de l'état d'avancement de la véraison de la placette et la date de mi-véraison est déterminée de la même façon que pour le débourrement et la floraison.

b. Deux générations à suivre en parallèle

Dans le contexte de l'année 2017, suite au gel, une deuxième génération de rameaux et de grappes s'est développée, parallèlement à la première. Trois types de parcelles sont ressortis du fait de la taille de nettoyage : les parcelles porteuses majoritairement de première génération (cas notamment des parcelles 1A, 12A, 19 et 22), les parcelles porteuses majoritairement de deuxième génération (cas des parcelles 4, 20, 23, 24 et 28) et les parcelles mixtes, la majorité.

La phénologie de la première génération a pu être suivie normalement sur les placettes-terroir qui n'avaient pas été touchées (MG, MA, CFG, CFA, CSG) ; la placette MS a été déplacée de quelques rangs pour être dans une zone moins touchée et la placette CFS a été abandonnée car dans une parcelle trop atteinte (parcelle 20).

Avant de savoir s'il y aurait une deuxième génération de grappes, il fallait d'abord suivre le débourrement de la deuxième génération de rameaux.

D'abord 3 parcelles nettoyées (parcelles 17, 27A et 30), puis 3 supplémentaires (parcelles 4, 11A et 29), ont fait l'objet de ce suivi. Dans les 5 premières, 20 pieds ont été repérés : 5 pieds consécutifs dans un rang de la première moitié de la parcelle, 10 pieds consécutifs dans le rang non-taillé, puis 5 pieds consécutifs dans un rang de la seconde moitié de la parcelle. Pour les 3 parcelles suivies plus tard, 10 pieds (2 répétitions de 5 pieds consécutifs espacées d'une vingtaine de pieds) dans un rang de la première moitié de la parcelle, 20 pieds (2 répétitions de 10 pieds consécutifs espacées d'une vingtaine de pieds) dans le rang non-taillé, puis 10 pieds (2 répétitions) dans un rang de la seconde moitié de la parcelle. Pour chaque pied étaient notés le nombre d'yeux laissés à la taille d'hiver, le nombre de rameaux encore vivants et le nombre d'yeux qui re-débourraient. Le nombre de pampres avait aussi été renseigné pour les 3 premières parcelles. Bien qu'instructifs, les résultats de cette étude ne pouvaient pas être mis en rapport avec un suivi précis de l'évolution de la température.

De fait, le même type de suivi a été mené autour des capteurs des parcelles les plus atteintes : dans la zone du capteur de la parcelle 20, dans les zones des dispositifs de suivi du gradient vertical des parcelles 23 et 24, dans la zone du capteur de la parcelle 24 proche de la station météo. Vingt pieds, localisés à moins de 5m des capteurs et ne portant plus aucun rameau de première génération, ont été marqués. Ces zones et ces pieds ont été désignés comme représentatifs de la deuxième génération. Puis les mêmes comptages de re-débourrement ont commencé. Mais la deuxième génération s'est révélée n'être pas du tout homogène (cf Figure 15) et pour déterminer la date de mi-débourrement comme la date où 50% des bourgeons ont débourré, il a fallu prolonger le suivi jusqu'à être sûr que tout ce qui devait débourrer avait effectivement débourré, et ainsi pouvoir assimiler dans le calcul le nombre final de bourgeons débourrés au nombre d'yeux laissés à la taille et par prorata déterminer la date où 50% des bourgeons avaient débourré. Le but de ce suivi était de voir comment serait le cycle de la vigne en



Figure 16 : Hétérogénéité de la vitesse de véraison au sein d'un même cep porteur de rameaux de deuxième génération.



Figure 17 : Hétérogénéité de la taille des grappes issues de rameaux de deuxième génération au sein d'un même cep.

démarrant dans des conditions plus chaudes ; il fallait donc que, comme à la sortie de l'hiver, il n'y ait aucun organe photosynthétique en place.

De la même façon que les 4 zones représentatives de la deuxième génération avaient été définies, vingt pieds indemnes du gel autour des capteurs des parcelles 1A, 12A et 27A ont été marqués pour représenter la première génération.

Les pieds de ces 7 zones ont par la suite été suivis pour repérer leur date de mi-floraison et de mi-véraison (cf Figure 16). Le nombre de grappes et leur taille (petite/moyenne/grosse, « grosse » étant la taille d'une grappe normale et « petite » étant la taille d'un grappillon) ont aussi été notés pour les pieds des zones représentatives de la deuxième génération (cf Figure 17).

Du fait du peu de grappes qu'ils portaient, la véraison des pieds représentatifs de la deuxième génération n'a pas pu être suivie selon le protocole indiqué plus haut. Elle s'est faite par estimation visuelle du pourcentage de baies vérées sur pied.

3 - La maturation

Le suivi de la maturation est un suivi classique pour les placettes-terroir. De la même façon que pour le suivi de la véraison, 400 baies sont récoltées aléatoirement par placette, puis équeutées, comptées, pesées, et ensuite pressées (2 pressées à 5bar avec une rebêche). Le moût est envoyé pour analyses en laboratoire afin de déterminer la concentration en sucres, le TAP (titre alcoométrique probable), l'acidité totale, le pH et la concentration en acide malique.

Deux des trois zones représentatives de la première génération étant localisées dans des placettes-terroir, le suivi de leur maturation était prévu. Le suivi de la maturation de la zone de la parcelle 1A a donc été ajouté aux parcelles suivies habituellement.

Pour la deuxième génération, le nombre de grappes était encore une fois insuffisant pour se permettre de faire un suivi continu de la maturation. Il a donc été prévu de faire un seul contrôle de maturité quand les parcelles auraient presque atteint ce stade.

C - L'analyse des données

1 - La constitution des bases de données

Les données de température récupérées par les capteurs n'étant pas directement exploitables, il a fallu les mettre en forme puis créer des bases de données pour les analyser.

a. Un document par capteur

Comme nous l'avons expliqué, les données des capteurs automatiques sont récupérables sur une plateforme Web alors que la récupération des données des capteurs manuels se fait via un câble USB reliant l'enregistreur à un ordinateur et cette manipulation fait perdre une heure de données. Dans les deux cas, on obtient des fichiers exploitables sur Excel, un par capteur et par date de récupération des données (les capteurs manuels sont relevés toutes les 2-3 semaines).

De plus les données des capteurs automatiques sont indiquées en heures GMT alors que les données des capteurs manuels sont indiquées en heure GMT+1 ou GMT+2 selon la date. Afin d'homogénéiser le tout, les données des capteurs manuels sont converties en heure GMT grâce à une macro.

Les différents fichiers d'un même capteur sont assemblés en un seul document Excel et, dans le cas des capteurs manuels, les données de l'heure perdue par la manipulation sont recréées en faisant la moyenne des valeurs de l'heure d'avant et de l'heure d'après pour chaque type de température (Tmax : température maximale ; Tmin : température minimale).

b. Une base de données par dispositif

Une base de données a été créée par dispositif et par année, en assemblant à la suite les documents des différents capteurs concernés dans un même fichier Excel.

Par convention, la température minimale du jour j est la plus basse température relevée sur 24h, de 19h au jour j-1 jusqu'à 18h au jour j (JourMin). De même, la température maximale du jour j est la plus haute température relevée sur 24h, de 7h au jour j jusqu'à 6h au jour j+1 (JourMax).

Afin de pouvoir déterminer les valeurs minimales et maximales journalières il a d'abord fallu créer deux nouvelles colonnes JourMin et JourMax dans la base de données pour redéfinir la date en fonction de ces deux règles.

Puis l'utilisation d'un Tableau Croisé Dynamique (TCD) a permis de déterminer pour chaque capteur la Tmin de chaque JourMin et la Tmax de chaque JourMax.

La mise en graphique du tableau obtenu a permis de visualiser les éventuelles valeurs aberrantes ainsi que les plages de valeurs manquantes. En fonction du dispositif, la gestion de ces valeurs n'est pas la même.

Dans le cas du « réseau », les valeurs manquantes et aberrantes sont gérées de la même façon que dans le cadre du projet Life-ADVICLIM. Les valeurs journalières aberrantes sont corrigées en retournant dans la base de données initiale pour remplacer les valeurs horaires aberrantes par les moyennes des heures les encadrant ; par mise à jour du TCD, les valeurs journalières sont corrigées. Ensuite, le pourcentage de valeurs manquantes est calculé pour chaque capteur sur l'année entière ainsi que sur la saison végétative (du 01 mars au 31 octobre). Si le capteur fournit moins de 70% de valeurs recevables sur la saison végétative ou moins de 60% de valeurs recevables sur l'année entière, alors il est considéré comme trop lacunaire et est supprimé de la base de données pour cette année. Sinon, il est conservé et les plages de valeurs manquantes sont remplacées par la moyenne des valeurs des autres capteurs incrémentée de l'écart moyen du capteur aux autres capteurs.

Dans le cas du dispositif d'étude du gradient thermique vertical, les valeurs aberrantes et les plages de valeurs manquantes d'un capteur sont remplacées par la moyenne des valeurs des autres capteurs situés à la même hauteur dans la même parcelle. Il a été décidé de ne pas tenir compte du pourcentage de valeurs manquantes et de conserver la totalité des capteurs, sinon il n'y aurait pas assez de valeurs pour l'analyse.

A la suite de ces traitements, nous obtenons pour chaque dispositif deux bases de données : celle des Tmin par JourMin et par capteur et celle des Tmax par JourMax et par capteur.

2 - Les analyses issues de ces données

a. Logiciels et tests utilisés

Pour analyser les bases de données, deux logiciels ont été utilisés : Excel, pour calculer des moyennes, des écarts-types ainsi que les indices bioclimatiques ; et RStudio pour les analyses statistiques, majoritairement des ANOVA (analyse de la variance) et des ANCOVA (analyse

de la covariance). La normalité et l'homoscédasticité des résidus ont été vérifiées grâce à des tests de Shapiro-Wilk et de Bartlett.

Le logiciel QGIS a permis de faire des cartographies de la température des capteurs à certaines dates, comme par exemple lors des nuits de gel.

b. Une problématique : s'affranchir de l'effet journalier de la variation de la température pour les analyses statistiques

Au cours de l'analyse des données, un problème est vite apparu. Nous cherchions à montrer les facteurs de variation de la température, or un facteur majoritaire est évidemment la date. Afin de s'affranchir de l'effet journalier, une méthode différente a été utilisée pour chaque dispositif.

Dans le cas du « réseau », nous avons décidé de calculer, pour T_{min} et pour T_{max}, la moyenne de l'ensemble des capteurs chaque jour. Ensuite nous avons calculé l'écart à la moyenne de chaque capteur chaque jour.

Dans le cas du dispositif d'étude du gradient thermique vertical, nous avons calculé, pour T_{min} et pour T_{max}, l'écart des valeurs des capteurs à 30, 60 et 90cm aux valeurs du capteur à 120cm au niveau de chaque piquet chaque jour.

Les températures brutes et les écarts ainsi calculés sont des données complémentaires.

c. Les indices bioclimatiques

La plupart des indices bioclimatiques reposent sur la température moyenne (T_{moy}). Définie comme la moyenne arithmétique de T_{min} et de T_{max} (donc $T_{moy} = (T_{min} + T_{max})/2$), elle a elle aussi été calculée en tant qu'écart pour s'affranchir de l'effet journalier.

Les indices de Winkler et de Huglin ont ensuite pu être calculés pour chaque capteur, ainsi que la somme thermique en base 0 pour confronter les dates de la floraison et de la véraison au modèle GFV.

Un autre indice a été calculé, basé sur le principe de l'indice de fraîcheur des nuits (CI pour Cool night Index). Contrairement au CI qui est calculé comme la moyenne des températures minimales au cours du mois de septembre en hémisphère Nord (Tonietto & Carbonneau, 2004), nous avons calculé la moyenne des températures minimales 30 jours avant la récolte, sur plusieurs années, dans le but de confronter ces valeurs aux notes des millésimes et ainsi pouvoir observer si la fraîcheur du mois précédent la vendange impacte la qualité du millésime.

d. Les nuits de gel

Suite aux nuits de gel, une étude des températures minimales de 2h à 9h lors des 4 nuits de gel (20, 21, 27 et 28 avril 2017) associée à une cartographie a permis de se rendre compte de la répartition des températures sur l'ensemble du vignoble et de la mettre en relation avec des dégâts observés. De plus, une étude du gradient thermique vertical a permis de se rendre compte quelles températures avaient subi les bourgeons et les rameaux.

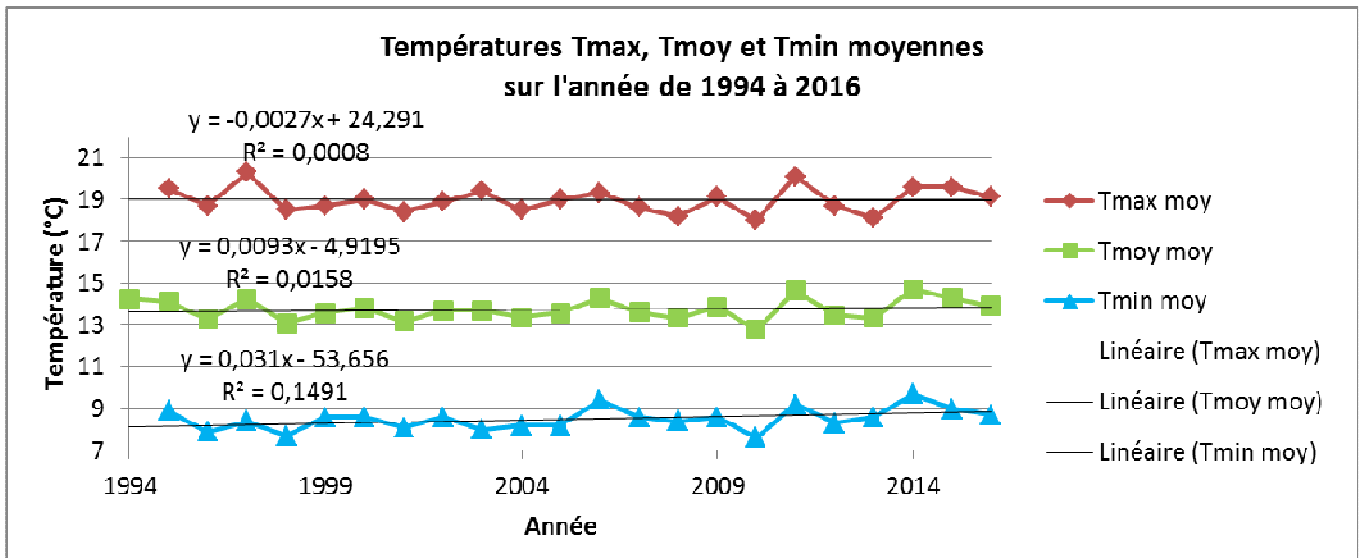


Figure 19 : Evolution des moyennes des températures maximales, moyennes et minimales de 1994 à 2016.

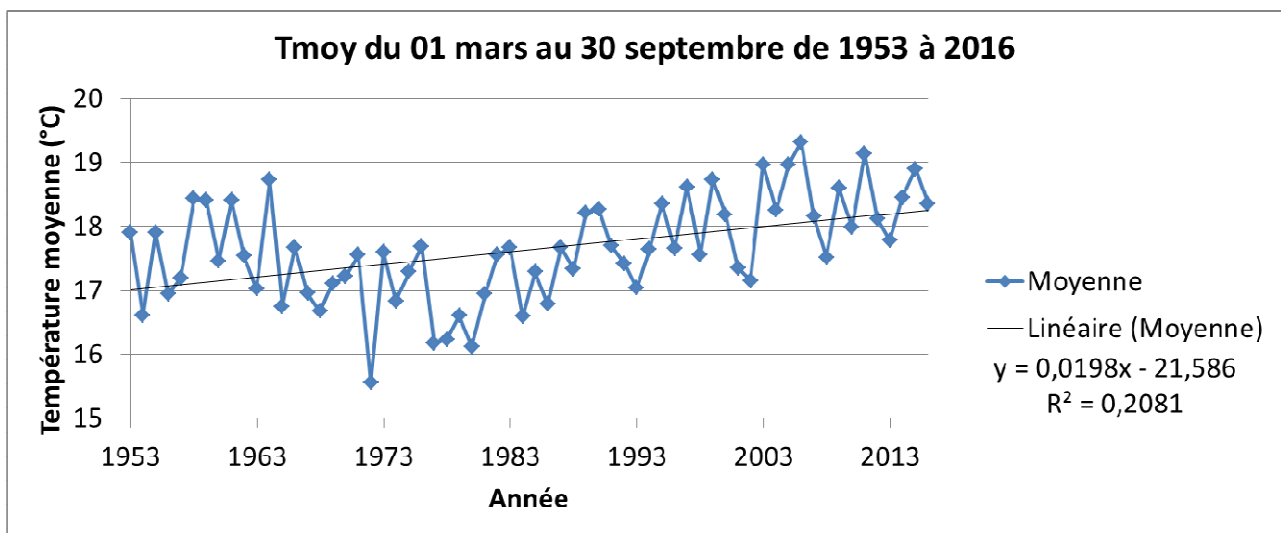


Figure 18 : Evolution de la température moyenne du 01 mars au 30 septembre de 1953 à 2016.

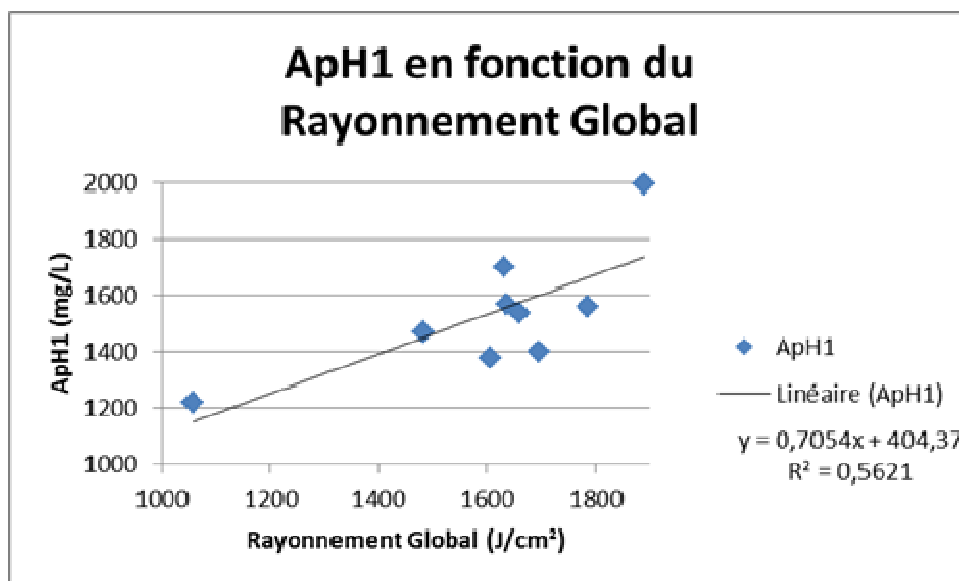


Figure 20 : Potentiel en anthocyanes moyen (mg/L) en fonction du rayonnement global (J/cm²) des Cabernets francs de 2006 à 2014.

La valeur d'ApH1 la plus faible correspond à l'année 2013 et la plus forte à l'année 2010.

RESULTATS ET DISCUSSION

A - Informations issues du dispositif au niveau de la station Météo-France

1 - Evolution générale de la température

Trois stations météorologiques se sont succédé depuis 1994 sur le domaine de Cheval Blanc, l'actuelle station Météo-France ayant été installée en 2006, permettant la constitution d'une base de données de températures quotidiennes depuis 1994.

L'étude de la moyenne des Tmax de chaque année depuis 1994, ainsi que les moyennes des Tmoy et des Tmin, permet de constater que ces trois types de températures sont globalement restées constantes depuis 1994 (cf Figure 18).

Or nous avons évoqué précédemment le fait que le réchauffement climatique s'était particulièrement accru depuis la fin des années 1980.

Des données de température plus anciennes, de 1953 à 1993 ont pu être récupérées grâce à la station Bordeaux-Mérignac, permettant de comparer la température moyenne du 1^{er} mars au 30 septembre de l'année 1953 à 2016 (seule période commune de données à notre disposition). Le graphique de la figure 19 nous permet effectivement de constater une augmentation de la moyenne de la température moyenne sur la saison végétative. En revanche nous n'observons pas de différence flagrante entre avant et après la fin des années 1980. Ceci est sûrement dû au fait que nous comparons des données sur 7 mois et non sur l'année entière.

2 - Quels facteurs influent sur la qualité du millésime le mois précédant la vendange ?

Nous avons cherché à déterminer dans quelle mesure la température pouvait influencer la qualité du millésime. Comme critère de qualité, nous avons d'abord choisi la note attribuée par Tastet & Lawton pour le vin rouge du bordelais de chaque millésime.

En premier lieu nous avons cherché à étudier l'impact des températures minimales avant les vendanges. Pour cela nous avons comparé les notes des millésimes à la température minimale moyenne 30 jours avant la récolte depuis 1993 (pour déterminer la date de la récolte nous avons pris la date moyenne entre celle du début de la récolte des Merlots et celle du début de la récolte des Cabernets francs). Mais le très faible coefficient de corrélation ($R^2=0.0064$) montre que les températures minimales moyennes du mois précédant la vendange ne sont pas un facteur important de la qualité du millésime.

Nous avons alors décidé de tester d'autres facteurs qui pourraient avoir une influence sur la qualité du millésime, en prenant leur valeur moyenne sur le mois précédent la vendange (lors de la maturation). Nous avons donc testé l'influence de la Tmin, la Tmax, le rayonnement global, le potentiel hydrique de tige et l'azote assimilable sur un autre critère que les notes millésimes : cette fois nous avons opté pour la valeur du potentiel total en anthocyanes (mesuré à pH1, écrit ApH1), cette variable représentant un des critères de qualité. Les données ont été compilées pour chaque cépage séparément et par année de 2006 à 2014, puis nous avons fait des analyses de variance pour tester les différents facteurs.

Il en ressort que le Merlot et le Cabernet franc n'ont pas le même comportement. La valeur de ApH1 ne dépend d'aucun des facteurs testés dans le cas du Merlot, en revanche dans le cas du Cabernet franc deux facteurs ont un effet significatif : le rayonnement global (significatif avec

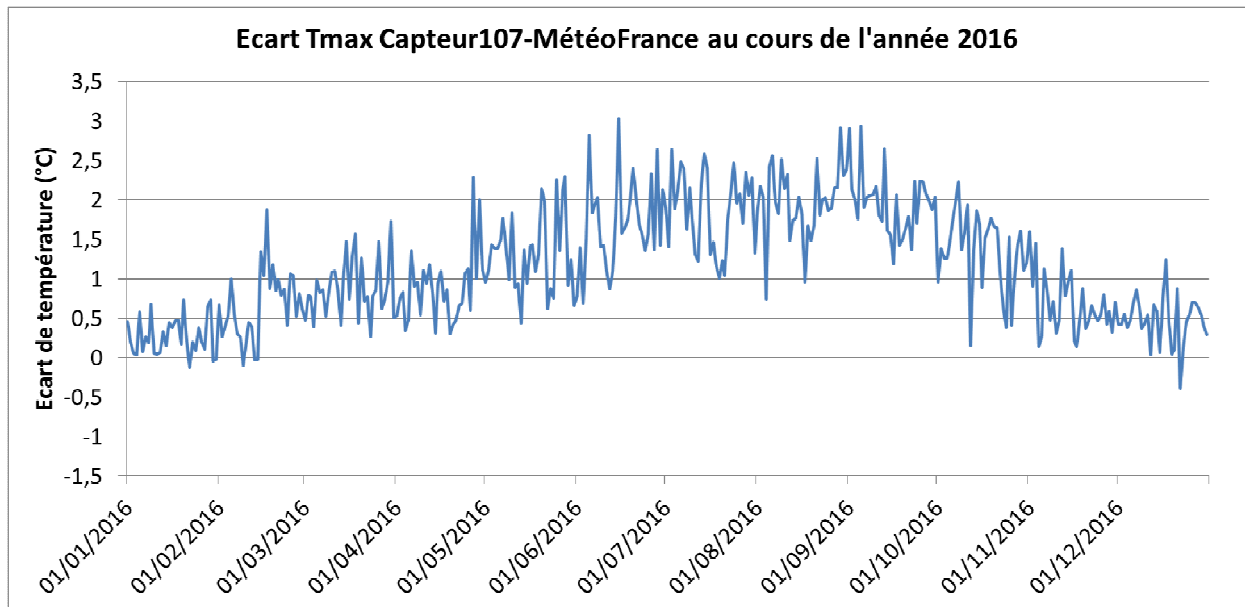


Figure 21 : Ecart des valeurs de Tmax relevées par le capteur 107 et la station Météo-France au cours de l'année 2016

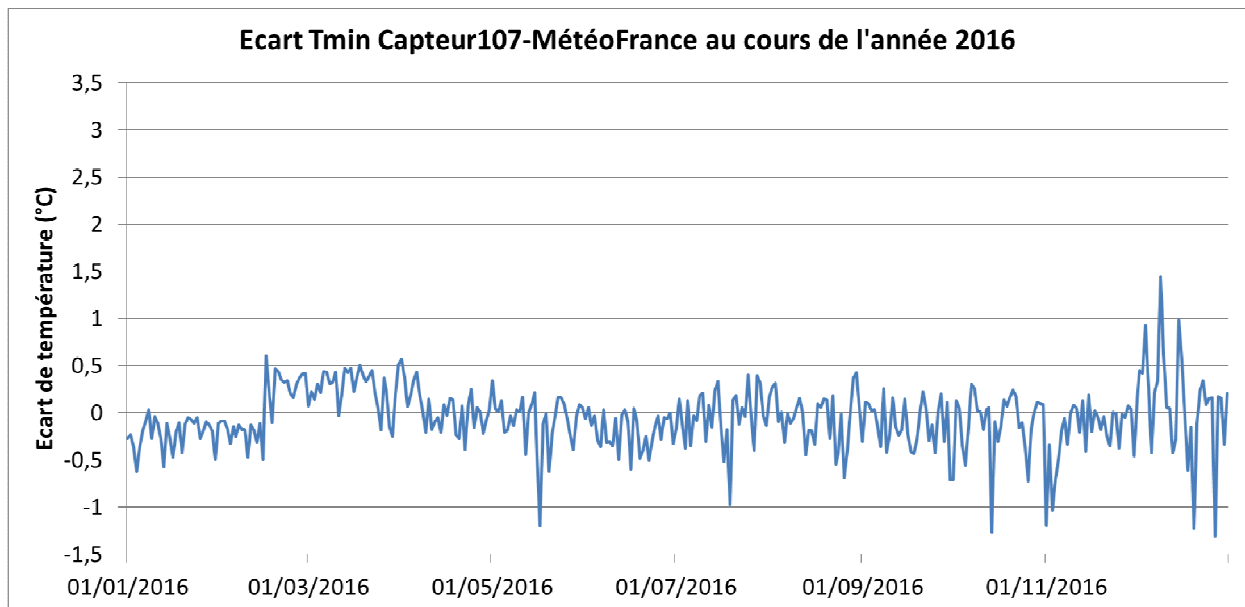


Figure 22 : Ecart des valeurs de Tmin relevées par le capteur 107 et la station Météo-France au cours de l'année 2016

$p=0.02<0.05$) et la température maximale (significative avec $p=0.0852<0.1$). En faisant leur représentation graphique puis une régression linéaire (cf Figure 20), il apparaît que le rayonnement global moyen lors du mois précédent la vendange explique 56% du potentiel total en anthocyane et que la température maximale moyenne en explique 36%. Précisons que l'interaction entre ces deux facteurs a été testée par ANOVA et a été réfutée.

Cependant il faut souligner la présence de deux valeurs « extrêmes » de rayonnement global, correspondant aux années 2010 ($R_g = 1890 \text{ J/cm}^2$) et 2013 ($R_g = 1058 \text{ J/cm}^2$), qui amplifient peut-être la tendance.

3 - Ecart entre les données de la station Météo-France et celles des capteurs

Le dispositif de capteurs autour de la station Météo-France a permis de répondre à une question importante : peut-on utiliser directement les données des capteurs de température (à 120cm et dans la végétation) pour calculer des indices bioclimatiques (qui sont basés sur les températures relevées par des stations comme la station Météo-France) ?

Pour cela nous avons comparé les températures obtenues par la station Météo-France et par le capteur situé à proximité, à 120cm et dans la végétation (capteur 107) au cours de l'année 2016.

En faisant la différence entre les données du capteur 107 et celles de la station Météo-France pour Tmax (cf Figure 21) et pour Tmin (cf Figure 22), nous avons pu faire un premier constat : en valeur absolue, l'écart moyen en Tmin est de 0.25°C (écart-type de 0.22°C) alors qu'en Tmax il est de 1.17°C (écart-type de 0.71°C). Autant l'écart en Tmin est négligeable car il est de l'ordre de grandeur de la précision du capteur (0.4°C), autant en Tmax l'écart est trop important pour être négligé.

Nous pouvons de plus souligner qu'il semble exister une saisonnalité dans les amplitudes de valeurs relevées par le capteur 107 et par la station Météo-France : celles-ci sont plus importantes en été qu'en hiver.

Or les calculs des indices bioclimatiques sont basés sur la température moyenne, moyenne arithmétique de la température minimale et de la température maximale ; comme les capteurs relèvent des températures maximales plus fortes, nécessairement les indices bioclimatiques calculés à partir de leurs données seront surestimés par rapport aux calculs basés sur les données de la station Météo-France.

Si l'on calcule l'indice de Winkler en 2016 d'après les températures relevées par le capteur 107 et la station Météo-France, on obtient une valeur de 1783°C dans le cas du capteur 107 (donc région III selon la classification d'Amerine et Winkler) et 1631°C dans le cas de la station Météo-France (donc région II selon la même classification), soit un delta de 152°C , l'équivalent de 15 jours environ.

Il apparaît donc évident que l'on ne peut pas calculer les indices bioclimatiques directement à partir des données des capteurs. Nous proposons donc, dans le cas où l'on cherche à calculer les indices bioclimatiques au niveau d'autres capteurs, d'apporter une correction correspondant à l'écart quotidien entre les valeurs de Tmax relevées par le capteur 107 et la station Météo-France. Cette correction n'est évidemment pas idéale, et n'est pour l'instant possible que pour 2016 (depuis l'installation du capteur 107).

Il serait intéressant de modéliser la relation entre ces deux types d'appareils de mesure de la température afin de déterminer un coefficient de correction éventuellement variable au cours de l'année.

4 - Impact de la végétation sur la température

En plus de la différence d'altitude entre les capteurs de température installés dans les parcelles et la station Météo-France, un autre facteur pourrait être à l'origine d'écarts de température entre ces deux types d'équipements ; il s'agit de la végétation. Alors que la station Météo-France est installée, comme toute station météorologique classique, dans une zone dégagée, les capteurs installés à 120cm dans les parcelles sont entourés de végétation, particulièrement de juin à novembre quand les rameaux atteignent le fil de tête et jusqu'à la chute des feuilles. Or la végétation est susceptible de créer un microclimat qui génèrerait une différence de température par rapport à un capteur à la même hauteur mais dans une zone dégagée. C'est dans ce but qu'ont été installés en juillet 2017 deux nouveaux capteurs dans la zone de la station Météo-France, fixés à 120cm et 175cm sur un piquet dans une zone dégagée. Le capteur à 175cm permettra de comparer les deux types d'appareillage (capteur TinyTag ou Météo-France) tous deux dans une zone dégagée ; le capteur à 120cm permettra de comparer les températures relevées par les capteurs TinyTag dans la végétation et dans une zone dégagée. Ces installations étant nouvelles, la première année de données qui pourra être étudiée sera l'année 2018.

5 - Conclusions et améliorations à apporter au dispositif

Grâce aux données de températures collectées depuis 1994 sur le domaine et à celles récupérées depuis 1953 par la station Bordeaux-Mérignac, nous avons pu constater que la température augmentait effectivement. En revanche, du fait que les données soient issues de nombreuses stations et que le jeu de données ne soit pas complet (quelques mois dans l'année seulement), cette étude de l'évolution de la température depuis 1953 n'est pas parfaitement représentative de l'évolution de la température sur le domaine depuis cette date.

Nous avons tout de même pu mettre en évidence que le rayonnement global a un effet significatif sur le potentiel en anthocyanes du Cabernet franc, tout comme les températures maximales bien que leur effet soit moins significatif. Il serait intéressant d'approfondir cette étude en analysant des données relevées à la parcelle (et en faisant la moyenne sur l'ensemble du domaine) pour plus de précision.

Les capteurs de la zone de la station Météo-France ont permis de montrer qu'il existait un écart assez fort entre les températures maximales relevées par la station Météo-France et celles relevées par les capteurs, ce qui suggère que l'on ne peut pas calculer d'indices bioclimatiques directement à partir des données des capteurs.

L'installation des deux nouveaux capteurs à 120 et 175cm dans une zone dégagée permettra à la fois de comparer les données issues d'une station météorologique classique et d'un capteur de température, ainsi que d'étudier l'impact de la végétation sur la température. Afin de s'assurer que la comparaison des capteurs à la même hauteur soit valable et qu'il n'y a pas d'effet de relief, il serait judicieux de relever l'altitude des 4 sondes par GPS. De plus, si l'étude de l'impact de la végétation devait avoir lieu, il serait intéressant d'installer à d'autres endroits du domaine des couples de capteurs à 120cm, l'un dégagé et l'autre dans la végétation.

Tableau 2 : Moyennes des Tmax, Tmoy et Tmin du 1er avril au 30 septembre et indices de Winkler et de Huglin (et indices Végétation) calculés à partir des données des capteurs installés sur l'ensemble du domaine, de 2013 à 2016.

Moy = Moyenne ; E-type = Ecart-type ; Ampli = Amplitude maximale

	2013			2014			2015			2016		
	Moy	E-type	Ampli	Moy	E-type	Ampli	Moy	E-type	Ampli	Moy	E-type	Ampli
Tmax	25,02	0,22	0,6	26,07	0,26	0,6	27,26	0,28	0,68	26,3	0,1	0,19
Tmoy	18,53	0,18	0,57	19,25	0,18	0,42	19,69	0,2	0,46	19,02	0,37	0,89
Tmin	12,04	0,37	0,95	12,43	0,3	0,69	12,12	0,46	1,15	11,73	0,66	1,64
Winkler	1761,6	40,4	124,3	1925,8	37,9	90,1	1908,1	41,8	102,6	1773,1	72,6	174,7
Huglin	2246,2	30,5	83,8	2409,2	37,6	79,3	2564,9	35,3	76	2411,9	42,2	97,3

Indice de Winkler Végétation	1612,1	71,1	171,1
Indice de Huglin Végétation	2181,5	42,2	97,3

B - Résultats issus des données du réseau de capteurs sur Cheval Blanc

1 - Variabilité de la température sur l'ensemble du domaine

L'analyse des températures et des indices bioclimatiques, calculés par capteur du réseau pour les années 2013 à 2016, montre qu'il existe une variabilité spatiale (et bien évidemment temporelle) de la température au sein du vignoble de Cheval Blanc. Le tableau n°2 reporte les valeurs des moyennes de la température maximale du 1^{er} avril au 30 septembre (saison végétative), de la température moyenne et la température minimale sur ce même pas de temps, ainsi que les moyennes des valeurs des indices de Winkler et de Huglin. Les moyennes (Moy) sont à chaque fois accompagnées de l'écart-type (E-type) ainsi que de l'amplitude maximale (Ampli) observée entre les capteurs sur l'année considérée.

Comme nous l'avons montré plus haut, il n'est pas pertinent de calculer les indices bioclimatiques directement à partir des données des capteurs. Ne pouvant pas corriger les valeurs de Tmax avant 2016, nous avons quand même calculé les indices bioclimatiques dans le but de faire une comparaison relative, et non en considérant les valeurs en tant que telles. En outre nous avons recalculé les indices bioclimatiques pour 2016 avec les températures maximales « corrigées » en enlevant l'écart calculé entre le capteur 107 et la station Météo-France ; nous avons indiqué ces nouveaux indices comme « Indice de Winkler Végétation » et « Indice de Huglin Végétation » dans le tableau n°2. Ceci nous permet de constater à nouveau l'importance de trouver un facteur de correction pour les températures maximales des capteurs.

Nous pouvons noter que les amplitudes maximales laissent présumer qu'il y a des parcelles plus chaudes et d'autres plus froides, ceci pouvant bien évidemment avoir des conséquences agronomiques, notamment sur la précocité.

Nous avons donc cherché à comprendre quels étaient les facteurs responsables de ces écarts de température entre parcelles.

2 - Impact du type de sol, du cépage, de la latitude, de l'altitude et du type de temps sur la température

Nous avons fait une première analyse en testant par ANOVA l'effet du sol et du cépage sur les températures maximales, moyennes et minimales, ainsi que sur les écarts à la moyenne de ces trois types de températures, et ce sur trois différents pas de temps : l'année entière, la saison végétative (du 1^{er} avril au 30 septembre) et l'été (du 1^{er} juillet au 30 septembre).

Les résultats de ces analyses de variance ont été confrontés aux moyennes des températures brutes et des écarts pour ne mettre en évidence que les résultats réellement significatifs (cf annexe n°1). En effet les capteurs de température ont une précision de $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ donc, si la différence entre deux moyennes est inférieure à cette valeur, nous avons considéré qu'il n'y avait pas de différence entre les moyennes, malgré une éventuelle significativité de l'ANOVA. Nous avons estimé que des écarts de moyennes entre 0.4 et 0.8°C étaient notables et que des écarts de moyennes supérieurs à 0.8°C étaient réellement importants, pour peu que l'ANOVA ait mis en évidence la significativité de leur différence.

Cela nous a permis d'avoir des premiers éléments de réponse. Déjà nous avons pu montrer que les Tmin (et écarts à la moyenne des Tmin) sont plus discriminantes que les Tmax et Tmoy. De plus, la période « Été » est plus discriminante que "Année" et "Saison végétative".

De plus, les sols S (sableux) sont significativement plus froids en T_{min} que les sols G (graveleux) et A (argileux). Bien que la différence soit moins marquée, les sols S sont significativement plus chauds en T_{max} que les sols G et A. L'amplitude thermique des sols S est donc plus forte que celle des sols G et A. Aucune différence thermique n'est mise en évidence entre les sols G et A. Bien que 2016 montre des différences à la fois statistiquement significatives, mais aussi avec des moyennes bien séparées, l'ANOVA a mis en évidence une interaction Sol*Cépage en T_{min} sur la saison végétative et l'été. Ceci serait dû à un effet parcelle, et pourrait donc remettre en cause la significativité individuelle du facteur sol et du facteur cépage.

Cette première étude faisait écho aux réflexions qui ont mené à installer des capteurs de température sur les placettes-terroir en 2013 : à ce moment, le domaine était considéré comme globalement plat et les seuls facteurs différenciant les placettes-terroir étaient leur sol et leur cépage. Mais les résultats obtenus depuis ont soulevé l'hypothèse d'au moins deux autres facteurs pouvant avoir une influence sur la température : le microrelief et la latitude. D'un autre côté, le seul impact que pouvait avoir le type de cépage sur la température aurait été de par sa densité de végétation, mais étant donné que la conduite de la vigne est maîtrisée, ce facteur n'avait pas de raison d'être.

Nous avons donc réalisé une seconde étude, cette fois-ci en considérant trois facteurs pouvant avoir une influence sur la température : le sol, l'altitude et la latitude, en suivant le même principe que pour l'étude précédente mais cette fois en faisant des analyses de covariance (ANCOVA) puisque les facteurs mis en jeu sont des variables qualitatives (le type de sol) et quantitatives (l'altitude et la latitude).

Les résultats de cette étude permettent d'appuyer l'hypothèse que l'altitude pourrait avoir un effet sur la température à l'échelle du domaine de Cheval Blanc car certaines analyses se sont révélées significatives. En revanche le réseau de capteurs en lui-même est critiquable pour mener une telle étude, car les capteurs sont localisés globalement tous dans la partie Sud du domaine et les différences d'altitude sont finalement faibles. La latitude varie elle aussi très peu à l'échelle du domaine, ce qui explique pourquoi les analyses n'ont pas mis en évidence d'effet significatif de ce facteur.

3 - Limites et améliorations à apporter au réseau de capteurs

Si à l'origine les capteurs de température étaient localisés au niveau des placettes-terroir, ce n'est plus le cas pour tous aujourd'hui. Lors des déplacements des placettes, soit les capteurs de température n'ont pas été réinstallés dans les nouvelles placettes, auquel cas il y avait perte du lien entre les données de température et les suivis agronomiques ; soit les capteurs ont été réinstallés dans les nouvelles placettes et de fait il y avait perte de la continuité de l'information (pour la température et les suivis agronomiques).

Dans un objectif de continuité et afin de faciliter les futures études, il est nécessaire de définir les placettes-terroir sur le long terme et de toutes les équiper de capteurs de température.

En revanche les placettes-terroir ne seront pas nécessairement réparties de façon homogène sur l'ensemble du domaine ; un réseau parallèle de capteurs de température serait nécessaire pour mener des études comme l'effet de l'altitude et de la latitude sur la température.

De plus, automatiser les capteurs présents sur le domaine permettrait de limiter les pertes de données par capteur ainsi que faciliter la récupération et la gestion des données.

C - Résultats issus des données du dispositif d'étude du gradient thermique vertical

1 - Impact de la hauteur sur la température et les indices bioclimatiques

a. Une étude préalable : les capteurs peuvent-ils être considérés comme étant à la même altitude ?

Comme l'objectif de ce dispositif est d'étudier le gradient vertical de température, il fallait s'assurer que l'écart d'altitude entre les capteurs situés à la même hauteur sur les piquets n'impacte pas la température.

Pour cela nous avons réalisé des mesures GPS des capteurs à 120cm de chaque piquet du dispositif. Puis nous avons fait une analyse de variance pour voir si la différence d'altitude relevée impliquait un écart entre les capteurs, en températures maximale, moyenne et minimale sur l'année 2016.

L'ANOVA n'a montré aucun résultat significatif. Nous pouvons donc considérer que la différence d'altitude entre les capteurs à la même hauteur est trop faible pour générer une différence de température.

Néanmoins cette analyse n'est pas très fiable. En effet, comme expliqué précédemment, lorsque des valeurs d'un capteur manquaient dans la base de données, elles étaient remplacées par la moyenne des autres capteurs de la même parcelle à la même hauteur. Or il se trouve que les capteurs à 120cm présentaient de nombreuses valeurs manquantes en 2016 ; les différences entre capteurs ont donc été réduites et lissées.

Nous considérerons quand même, dans le reste de l'étude, que les capteurs à la même hauteur sur les piquets du dispositif d'étude du gradient thermique vertical sont effectivement à la même altitude.

b. Variabilité de la température en fonction de la hauteur

Afin d'étudier l'impact de la hauteur sur la température, nous avons compilé les données de 2016 du dispositif d'étude du gradient thermique vertical et nous avons réalisé des analyses de variance des températures minimales, maximales et moyennes sur 3 pas de temps (année entière, saison végétative (1^{er} avril au 30 septembre), été (1^{er} juillet au 30 septembre)) et pour les 4 hauteurs de capteurs (30, 60, 90 et 120cm). Dans le but de gommer l'effet journalier de variation de la température, nous avons également fait le même type d'analyses en étudiant cette fois les écarts de température entre le capteur à 120cm de chaque piquet et les trois autres capteurs.

Ces analyses et les graphiques des températures brutes et des écarts de température au cours de l'année nous ont permis de mettre en évidence que, dans le cas de la parcelle enherbée, la hauteur du capteur a un effet significatif sur la Tmax au cours de la saison végétative et de l'été, et sur la Tmoy au cours de l'été. Il ressort qu'en Tmax et en Tmoy la température est plus chaude près du sol et diminue avec la hauteur.

Contrairement à ce qui aurait pu être attendu, les Tmin n'ont pas été discriminantes. L'observation des écarts de Tmin au capteur à 120cm donne peut-être une explication : en effet de début juin à début novembre les écarts de Tmin sont inférieurs à la sensibilité des capteurs ; il semble ne pas y avoir de différence de température en fonction de la hauteur. Or cette période correspond au moment où les capteurs sont dans la végétation. Il est probable que la végétation ait tamponné la température minimale de par l'environnement qu'elle

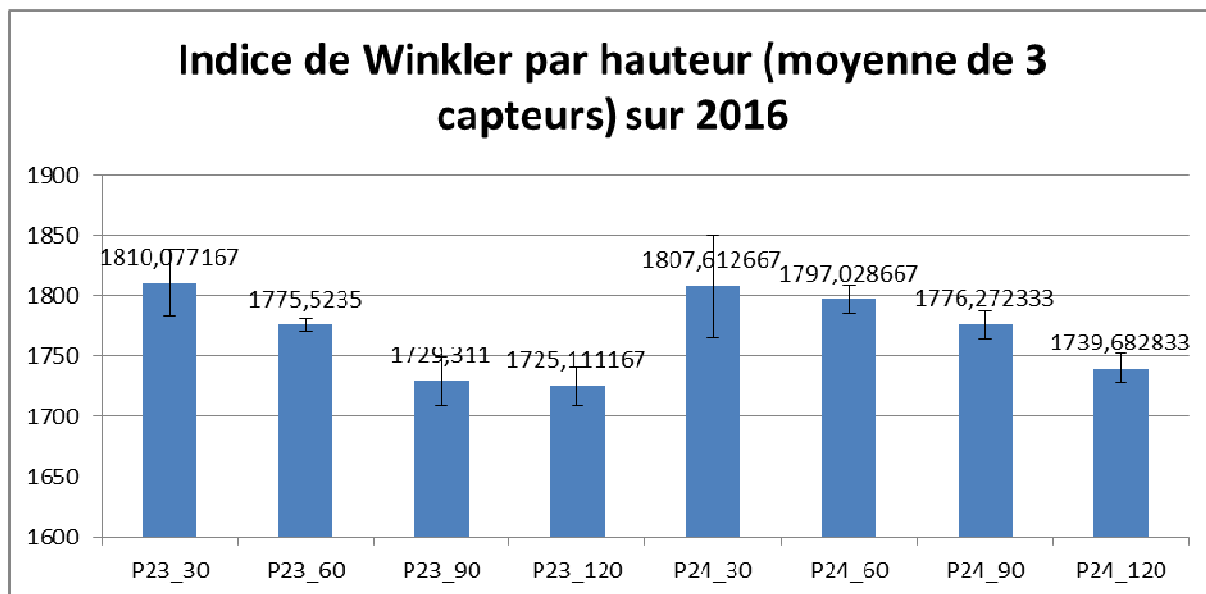


Figure 23 : Indices de Winkler par hauteur (30, 60, 90 et 120cm) des parcelles 23 (enherbée) et 24 (labourée) sur l'année 2016

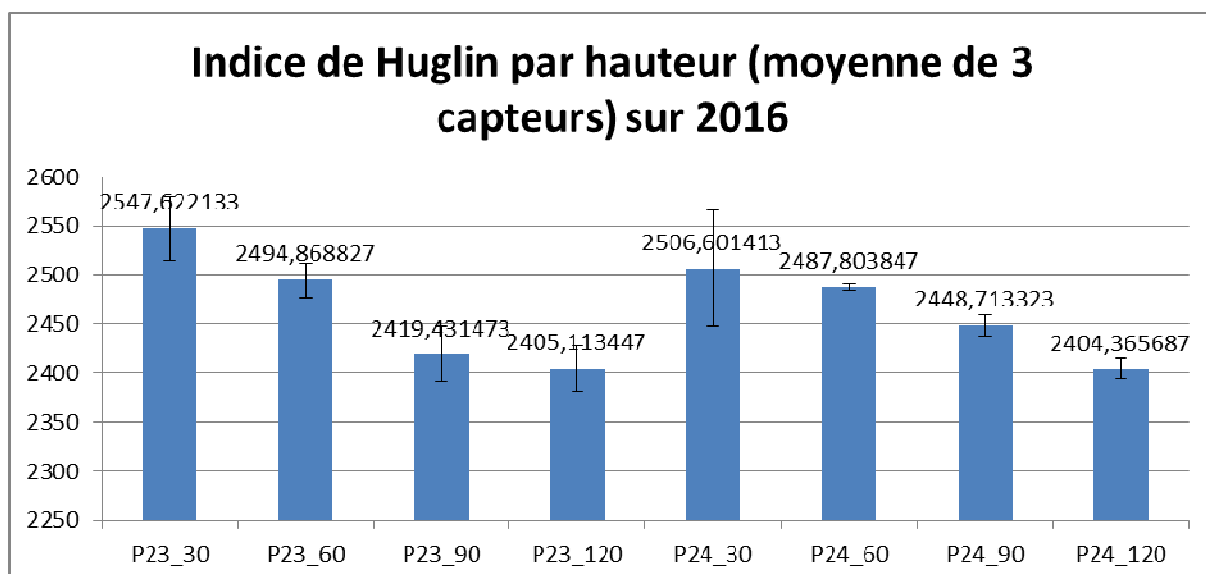


Figure 24 : Indices de Huglin par hauteur (30, 60, 90 et 120cm) des parcelles 23 (enherbée) et 24 (labourée) sur l'année 2016

gènère. Ceci pourrait faire l'objet d'une étude plus approfondie.

Au vu des écarts de T_{min} le reste de l'année, quand les capteurs ne sont pas dans la végétation, nous aurions pu nous attendre à ce que l'analyse de variance montre un effet significatif de la hauteur sur les T_{min}. Or ce n'est pas le cas, et bien que les écarts au capteur à 120cm soient significatifs, encore une fois leur moyenne est inférieure à la sensibilité du capteur donc on ne peut pas conclure à un réel effet de la hauteur sur les T_{min} en 2016.

c. Inversions thermiques et mise en relation avec le type de temps

En faisant la représentation graphique des températures au cours de l'année, nous avons pu nous rendre compte que la plupart du temps, comme confirmé par l'analyse précédente, la T_{max} est plus chaude pour le capteur le plus proche du sol et elle diminue avec l'altitude.

Or certaines journées on peut observer une inversion de ce gradient, ce que l'on appelle une « inversion thermique ». C'est le cas par exemple le 06/01/2016, le 16/09/2016, le 29/10/2016, le 30/10/2016, le 05/11/2016 et le 29/12/2016.

Si l'on s'intéresse au type de temps à l'heure où la température était maximale ces journées-là (les jours étant définis de 07h au jour j jusque 06h au jour j+1 lorsque l'on étudie la température maximale, ce que nous appelons les JoursMax), les 6 dates citées renvoient à trois cas de figure.

Dans le premier cas, la température maximale était en journée (à 17h le 16/09/2016 et à 10h le 05/11/2016) et l'élément notable à ces heures est la présence de vent entre 6 et 10km/h avec des rafales entre 24 et 30km/h (relevé par la station Météo-France).

Dans le deuxième cas, la température maximale était en journée (à 14h le 29/10/2016 et le 30/10/2016) et l'élément notable à ces heures est la chute ponctuelle de l'humidité relative qui passe d'environ 95% à environ 65% (relevée par la station Météo-France).

Dans le dernier cas, la température maximale était en fait la nuit (à 6h le 07/01/2016, comptant pour le 06/01/2016 en JoursMax et à 3h le 30/12/2016, comptant pour le 29/12/2016 en JoursMax). Or la nuit, par ciel clair et sans vent, le bilan radiatif est négatif et la surface du sol se refroidit, de plus l'air froid reste proche du sol du fait de la gravité, ce qui inverse le gradient thermique vertical.

Une étude plus approfondie de l'influence du type de temps sur les inversions thermiques permettrait de déterminer si les éléments notables cités plus haut sont effectivement des facteurs d'inversions thermiques.

d. Rehausser la tête du cep permettrait-il de gagner quelques degrés et retarder la maturité ?

Il aurait été intéressant de comparer les indices bioclimatiques calculés pour chaque hauteur afin de déterminer si une hauteur permettait d'obtenir des indices plus faibles et donc de retarder la maturité.

Cependant nous avons montré que les indices bioclimatiques calculés à partir des températures relevées par les capteurs ne correspondent pas aux indices bioclimatiques usuels calculés à partir de stations météo classiques. Nous proposons donc d'appeler les indices bioclimatiques calculés à partir des capteurs « Indice de Winkler Végétation » et « Indice de Huglin Végétation ». Et bien que nous puissions corriger les températures maximales des capteurs à 120cm grâce à l'écart entre les valeurs de la station Météo-France et celles du capteur 107, nous ne savons pas comment les corriger pour les capteurs des 3 autres hauteurs.

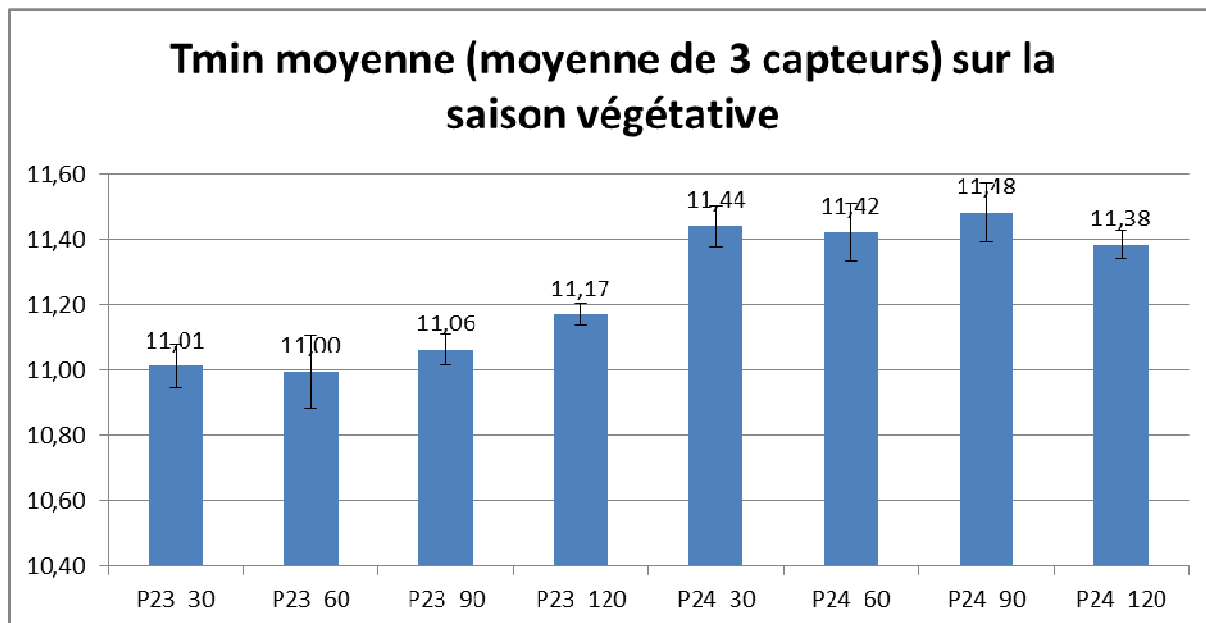


Figure 25 : Moyenne de la Tmin par hauteur (30, 60, 90 et 120cm) des parcelles 23 (enherbée) et 24 (labourée) sur la saison végétative de l'année 2016

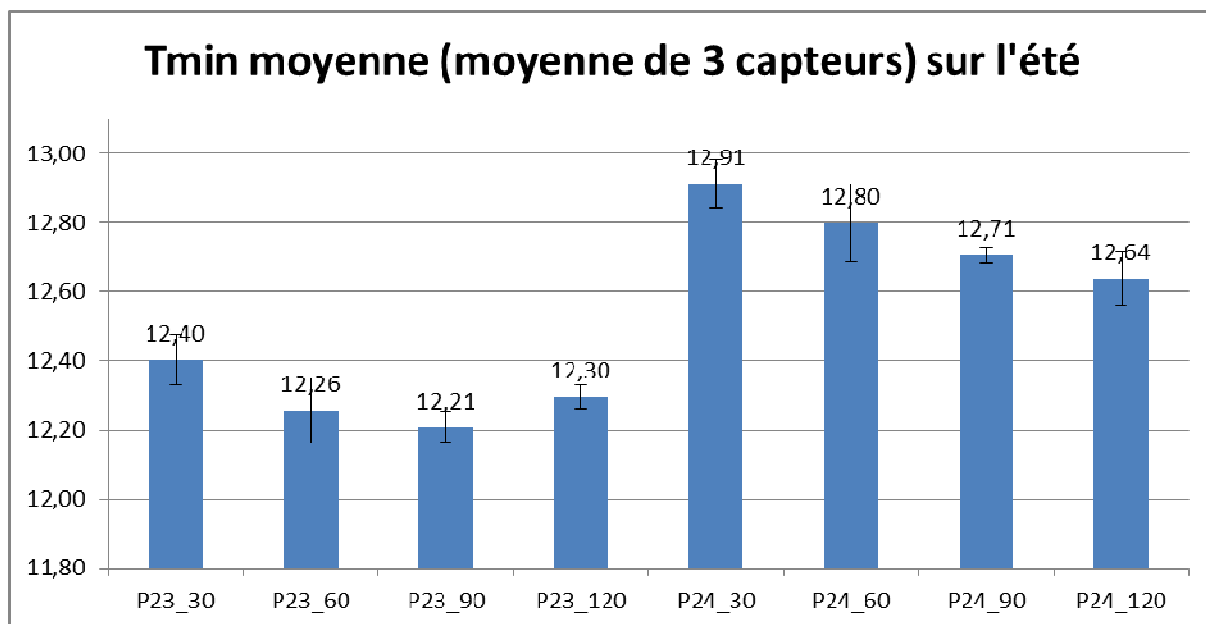


Figure 26 : Moyenne de la Tmin par hauteur (30, 60, 90 et 120cm) des parcelles 23 (enherbée) et 24 (labourée) sur l'été de l'année 2016

Toutefois si l'on fait les calculs dans le but non pas d'étudier les valeurs en tant que telles mais les écarts relatifs des indices entre les hauteurs, les résultats sont intéressants. Il semble en effet que les indices diminuent avec la hauteur (cf figures 23 et 24).

Il semblerait donc plausible que remonter la tête du cep pourrait permettre de diminuer la température moyenne et donc les indices bioclimatiques, ce qui pourrait permettre de retarder la maturité.

Il faudrait reproduire cette étude sur plusieurs années pour valider cette hypothèse, en faisant attention à ce que les capteurs ne soient pas au milieu de la végétation afin de déterminer si la T_{min} ne varie effectivement pas en fonction de la hauteur ou si la non-variabilité des T_{min} en 2016 est due à la végétation. Car s'il s'avérait que la T_{min} varie en fonction de la hauteur, on devrait normalement observer un gradient thermique vertical inversé la nuit, donc les capteurs les plus bas, qui sont les plus chauds le jour, devraient être les plus froids la nuit. De fait l'ordre du classement des indices bioclimatiques en fonction de la hauteur dépendra de l'écart entre les amplitudes de T_{max} et les amplitudes des T_{min} entre capteurs.

2 - Impact du travail du sol sur la température

Les analyses réalisées pour l'étude de l'effet de la hauteur sur la température nous ont également permis de comparer l'effet de deux modalités de travail du sol (parcelle enherbée ou labourée) sur la température.

Nous avons ainsi pu mettre en évidence qu'en 2016 seules les T_{min} permettaient de mettre en évidence un effet du travail du sol sur la température à un seuil de 0.1% pour les hauteurs 30, 60 et 90cm lors de la saison végétative et en été (et à un seuil de 0.05% dans le cas des capteurs à 60cm en été).

Si l'on étudie les moyennes des T_{min} de chaque hauteur sur la saison végétative et sur l'été (cf figures 25 et 26) on peut effectivement se rendre compte que les capteurs de la parcelle labourée (P24) ont relevé des T_{min} plus élevées que ceux de la parcelle enherbée (P23). L'enherbement induit donc des températures plus fraîches la nuit comparativement au labour. Nécessairement, ces différences vont se répercuter sur les indices bioclimatiques et particulièrement sur celui de Winkler (l'indice de Huglin donnant plus de poids aux températures maximales et celles-ci n'étant pas significativement différentes selon le travail du sol, les différences entre indices de Huglin seront moins significatives). Encore une fois, il s'agit de regarder l'écart entre ces indices et non leurs valeurs. La figure 23 nous permet de constater qu'aux hauteurs 60 et 90cm l'écart entre les indices de Winkler dû au travail du sol est significatif. L'enherbement serait donc une voie envisageable pour retarder la maturité.

Nous pouvons aussi noter le fait qu'il n'y ait pas de différence significative due au travail du sol entre les T_{min} des capteurs à 120cm. Il semblerait donc que l'effet du travail du sol s'estompe avec la hauteur.

Nous avons cherché à savoir si les travaux du sol pouvaient impacter la température juste après leur réalisation. Grâce à l'historique des opérations culturales, nous avons pu pointer les jours où un labour a été fait sur la parcelle 24, et une tonte ou bien une destruction de l'enherbement sur la parcelle 23. Nous avons regardé s'il y avait une modification visible de la T_{min} du fait de ces opérations ; ce n'est pas le cas. Il semblerait que la variation journalière de température soit plus forte que l'impact d'une opération de travail du sol.

3 - Une modalité (Hauteur x Travail du sol) pour diminuer la température ?

Afin de déterminer quelle combinaison hauteur*travail du sol permettrait le plus de diminuer les indices bioclimatiques et donc d'optimiser les chances de retarder la maturité, il faudrait comparer les indices bioclimatiques obtenus par chaque modalité.

Or les indices que nous avons calculés pour 2016 ne peuvent pas être pris en compte. Toutefois au vu des différents résultats nous pouvons émettre l'hypothèse que les variations des Tmax entre hauteurs sont plus fortes que les variations des Tmin entre hauteurs. De fait, bien que les hauteurs les plus basses soient à la fois les plus chaudes en Tmax et les plus froides en Tmin, il devrait ressortir que les indices bioclimatiques réels sont plus forts pour les hauteurs les plus basses et qu'ils diminuent avec l'altitude.

Ainsi, enherber la parcelle et augmenter la hauteur de la tête de cep pourrait être un moyen de diminuer la température moyenne au niveau des grappes et donc retarder la maturité de quelques jours.

Cependant ces modalités sont des choix techniques qui ne sont pas sans conséquences. En effet si l'on veut diminuer la température en augmentant la hauteur du tronc, quelle hauteur est acceptable ? Car augmenter la hauteur du tronc signifie aussi une adaptation du palissage voire des machines étant donné qu'il faudrait par exemple augmenter la hauteur de rognage pour conserver le rapport feuille/fruit. Et si l'on augmentait la hauteur du tronc est-ce que la température serait la seule variable mise en jeu ?

De même, l'enherbement est un choix qui doit être réfléchi en fonction d'autres variables que la température seule, comme l'alimentation hydrique par exemple.

4 - Améliorations possibles du dispositif d'étude du gradient thermique vertical

Il serait intéressant de poursuivre cette étude en améliorant le dispositif afin de pouvoir interpréter correctement les résultats.

Par exemple, afin de pouvoir calculer les indices bioclimatiques pour chaque hauteur, il serait judicieux de rajouter 3 capteurs à 30, 60 et 90cm sur le piquet dégagé au niveau du dispositif de la station Météo-France, ainsi qu'au niveau du piquet du capteur 107 (dans la végétation). Ainsi nous pourrions réellement étudier l'effet de la hauteur et de la végétation sur la température et développer des coefficients de correction à apporter aux valeurs des capteurs de température en fonction de leur hauteur.

D - Etude des nuits de gel d'avril 2017

1 - Deux vagues de froid

En avril 2017, deux vagues de gel sont passées sur le Château Cheval Blanc à une semaine d'intervalle. D'abord les nuits du 20 et du 21 avril, puis les nuits du 27 et 28 avril. Ces épisodes de gel, particulièrement celui de la nuit du 27 avril, ont eu de lourdes conséquences agronomiques.

Les différents dispositifs d'étude de la température présents sur le vignoble nous ont permis d'analyser assez finement la répartition de la température, à la fois spatialement ainsi qu'en fonction de la hauteur, lors de ces quatre nuits.

2 - Variabilité spatiale de la température ces nuits-là

Au lendemain de la nuit du 27 avril, la nuit la plus froide, nous avons cherché à savoir comment la température avait évolué sur l'ensemble du domaine au cours des trois nuits de gel (l'analyse de la température sur l'ensemble du domaine n'a pas été faite pour la nuit du 28 avril).

Nous avons donc regardé l'évolution des températures minimales entre 2h et 9h du matin au cours des 3 nuits pour l'ensemble des capteurs à 120cm présents sur le domaine, c'est-à-dire en prenant en compte également le capteur 107 à proximité de la station Météo-France et les capteurs à 120cm du dispositif d'étude du gradient thermique vertical des parcelles 23 et 24 pour lesquels nous avons fait la moyenne par parcelle (cf annexe 2).

Ces graphiques nous ont déjà permis de confirmer que la nuit du 27 avril avait effectivement été la plus froide, avec un minimum de -3.5°C à 7h du matin pour le capteur 95 installé dans la parcelle 28B. De plus il était intéressant de constater que l'ordre (du plus froid au plus chaud) des capteurs était le même au cours des trois nuits, avec le capteur 95 (parcelle 28B) toujours le plus froid et le capteur 20 (parcelle 1A) toujours le plus chaud. Ceci peut s'expliquer par le fait que la parcelle 1A est sur des graves labourées au Nord du domaine alors que la parcelle 28B est située sur des argiles enherbées dans une cuvette au Sud du vignoble. La parcelle 1A est sortie indemne de ces épisodes de gel, contrairement à la parcelle 28B qui a été gelée tellement sévèrement qu'il a été décidé de l'arracher. La grande haie en bordure de route sur la face Sud de la parcelle 28B a sûrement amplifié l'effet de cuvette en emprisonnant l'air froid et lourd en un « lac » d'air froid.

Nous pouvons également remarquer que les courbes des différents capteurs semblent plus groupées lors de la nuit du 20 avril, sont un peu plus détachées lors de la nuit du 21 avril et sont bien séparées lors de la nuit du 27 avril. Nous pouvons mettre ces observations en rapport avec le vent qu'il faisait ces nuits-là : plus de vent lors de la nuit du 20 avril (environ $7,2\text{km/h}$ avec des rafales à environ $16,5\text{km/h}$) que lors de la nuit du 21 avril (environ $1,4\text{km/h}$ avec des rafales à environ $8,3\text{km/h}$) et il n'y a pas eu de vent la nuit du 27 avril.

Selon ces graphiques, seul le capteur 95 (parcelle 28B) a atteint et dépassé la température-seuil de -2.5°C à partir de laquelle les bourgeons prêts à débourrer et les jeunes pousses gèlent. Or nous avons pu observer que d'autres parcelles porteuses de capteurs ont gelé aussi. Il faut préciser que les températures présentées dans ces graphiques ont été relevées à 120cm de hauteur, or les rameaux et bourgeons étaient situés à environ 45cm du sol et comme nous allons le voir, la hauteur a eu un réel impact ces nuits-là.

3 - Gradients thermiques verticaux des 4 nuits

Afin d'étudier le comportement des températures minimales en fonction de la hauteur lors des 4 nuits de gel, nous avons utilisé le dispositif d'étude du gradient thermique vertical, avec lequel nous avons fait pour chaque heure, entre 2h et 9h du matin pour chacune des 4 nuits, la moyenne des valeurs de T_{min} relevées par les 3 capteurs à la même hauteur de la même parcelle (cf annexes 3 et 4). Sur les graphiques nous avons symbolisé par une plage rouge la zone où les températures sont inférieures à -2.5°C , température létale pour les parties herbacées et les bourgeons de printemps. Pour les nuits du 27 et du 28 avril qui ont été plus froides, nous avons également calculé la moyenne des températures recensées à 30 et à 60cm pour représenter la température probable à 45cm soit à la hauteur du fil porteur et donc des bourgeons.

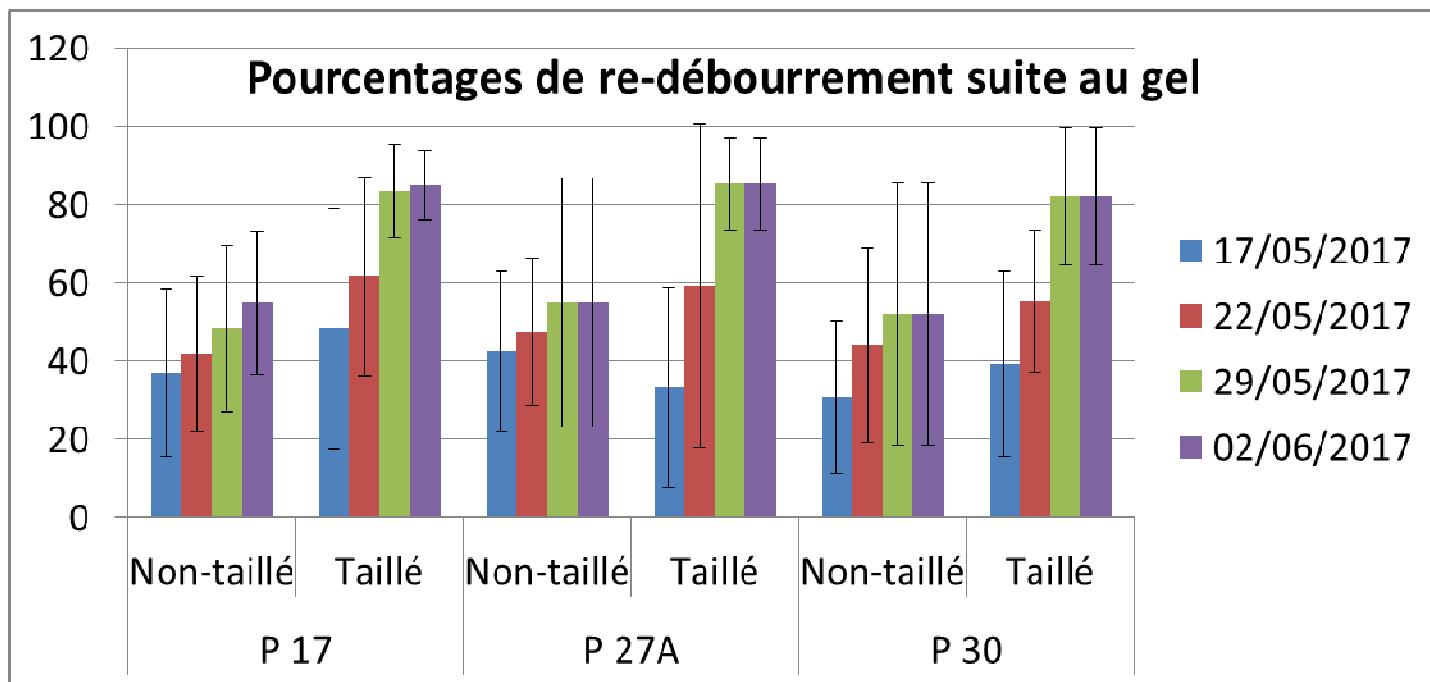


Figure 27 : Evolution du 17/05/2017 au 02/06/2017 des pourcentages de re-débourrement de pieds re-taillés ou non des parcelles 17, 27A et 30 suite au gel d'avril 2017



Figure 28 : Re-débourrement de l'oeil d'un rameau gelé conduisant au développement de rameaux secondaires et tertiaires ainsi que d'entre-cœurs

Ces graphiques nous permettent de constater que l'inversion thermique a eu lieu au cours des 4 nuits, c'est-à-dire que les températures étaient plus froides au niveau du sol et augmentaient avec l'altitude. Les écarts entre les T_{min} à 120cm et à 30cm, en moyenne de 1,19°C sur ces 4 nuits, ont atteint 2.7°C à 5h la nuit du 21 avril dans la parcelle 23. Ceci nous fait prendre conscience que les températures relevées à 120cm ne sont pas représentatives de celles que ressent la vigne.

Nous avons aussi pu mettre en évidence que dans la parcelle 23, enherbée (comparativement à la parcelle 24, labourée), les T_{min} étaient toujours plus basses et les amplitudes entre les T_{min} à 120 et à 30cm étaient toujours plus importantes. Si l'on s'intéresse à la T_{min} à 45cm la nuit du 27 avril, on peut constater que non seulement sa valeur minimale était plus basse dans le cas de la parcelle 23 (-3.3°C) que dans le cas de la parcelle 24 (-2.7°C), mais aussi qu'elle est restée inférieure au seuil de -2.5°C pendant plus longtemps dans le cas de la parcelle 23 (plus de 2h) que dans le cas de la parcelle 24 (un peu plus d'1h).

Il semble donc que l'enherbement a conduit à des températures plus basses notamment dans la zone des bourgeons, ceci ayant des conséquences sur le développement a posteriori de la vigne.

4 - Les conséquences sur la vigne

Comme nous l'avons déjà expliqué, les vignes ont été « nettoyées » après le gel pour faire tomber tout ce qui se nécrosait, excepté un rang par parcelle. Nous avons suivi le re-débourrement de la vigne afin de déterminer si la consigne de taille se révélait être judicieuse. Les résultats de ce suivi sont reportés dans la figure 27 pour les parcelles 17, 27A et 30. Les forts écarts-types traduisent l'hétérogénéité du re-débourrement. Nous pouvons néanmoins constater que plus de bourgeons ont re-débourré dans le cas des rangs taillés que dans le cas des rangs non-taillés. Etant donné que nous comptions un œil comme « re-débourré » si au moins un bourgeon d'hiver, secondaire ou tertiaire, débourrait à son emplacement (parfois les deux débourraient sur le même emplacement ; cf figure 29), les pourcentages de re-débourrement traduisent le pourcentage d'yeux potentiellement fructifères sur ces rangs.

Les valeurs plus faibles de re-débourrement dans le cas des rangs non-taillés s'expliquent notamment par le fait que les prompts-bourgeons laissés à la base des rameaux gelés se développaient souvent au détriment des bourgeons d'hiver secondaires et tertiaires. En revanche certains bourgeons d'hiver des rangs non-taillés se sont développés parallèlement aux prompts-bourgeons sur le même emplacement (cf figure 28). Au fur et à mesure du développement des rameaux, les rangs non-taillés sont devenus buissonnants tout en portant toujours des parties nécrosées. Pour des raisons sanitaires ainsi que pour faciliter la taille de l'hiver suivant, il a été décidé de tailler ces rangs pour baisser le nombre de rameaux.

Au niveau des parcelles 20, 23 et 24 nous avons aussi marqué des pieds pour suivre leur re-débourrement mais contrairement au suivi sur les parcelles 17, 27A et 30, nous avons cette fois choisi des pieds ne portant plus aucun organe herbacé.

Pour la parcelle 20, 90% des yeux d'hiver ont re-débourré avec des bourgeons secondaires et/ou tertiaires ; pour la parcelle 24 ce taux est de 84% et pour la parcelle 23 il est de 59%.

La différence d'intensité des T_{min} observée notamment la nuit du 27 avril entre les parcelles 23 et 24 explique peut-être cet écart de taux de re-débourrement : il est possible que les très basses T_{min} atteintes dans la parcelle 23 aient également gelé les bourgeons secondaires et tertiaires. Une autre hypothèse pourrait être que, la parcelle 23 étant enherbée, la concurrence pour les éléments du sol ainsi que l'épuisement partiel des réserves (pour produire des rameaux en vain avant le gel) ont limité les ressources pour faire débourrer l'intégralité des yeux.

Tableau 3 : Sommes thermiques atteintes aux dates de mi-débourrement, mi-floraison et mi-véraison de 3 parcelles de 1ère génération (1A, 12A et 27A) et de 3 parcelles de 2ème génération (20, 23, 24) et deltas de nombre de jours et de somme thermique entre les stades.

	50% débourrement			50% floraison			50% véraison			
	Jour	Jour julien	ΣT base 0	Jour	Jour julien	ΣT base 0	Jour	Jour julien	ΣT base 0	
1ère génération	P 1A (M)	02/04/2017	92	435,8	24/05/2017	144	1252,8	22/07/2017	203	2613,0
	P 12A (CF)	07/04/2017	97	476,8	27/05/2017	147	1270,7	30/07/2017	211	2722,5
	P 27A (CF)	06/04/2017	96	452,5	28/05/2017	148	1270,2	30/07/2017	211	2667,2
2ème génération	P 20 (CF)	18/05/2017	138	x	18/06/2017	169	x	22/08/2017	234	x
	P 23 (M)	23/05/2017	143	698,2	18/06/2017	169	1272,0	16/08/2017	228	2561,8
	P 24 (M)	21/05/2017	141	658,9	18/06/2017	169	1279,5	16/08/2017	228	2581,7

	Débourrement-floraison		Floraison-véraison		
	Δ jours	$\Delta\Sigma T$ base 0	Δ jours	$\Delta\Sigma T$ base 0	
1ère génération	P 1A (M)	52	816,9	59	1360,3
	P 12A (CF)	50	793,9	64	1451,8
	P 27A (CF)	52	817,6	63	1397,1
2ème génération	P 20 (CF)	31	662,2	65	1430,7
	P 23 (M)	26	573,7	59	1289,8
	P 24 (M)	28	620,6	59	1302,2

E - Comparaison des deux générations

1 - Des phénologies décalées

En 2017, deux générations de rameaux et de grappes se sont développées parallèlement. Si la première génération, qui a échappé au gel, s'est révélée belle, abondante et homogène, la deuxième génération en revanche s'est révélée asynchrone et beaucoup moins fructifère.

Il a été décidé d'assumer cette deuxième génération et de l'entretenir normalement pour ensuite la vinifier séparément. Il était donc nécessaire de suivre son développement car aucune documentation ne renseignait sur les conséquences d'une telle prise de décision.

Comme expliqué précédemment, nous avons suivi le développement de 20 pieds proches de capteurs de température dans 3 parcelles représentatives de la 1^{ère} génération (parcelles 1A en Merlot, 12A et 27A en Cabernet franc) et dans 3 parcelles représentatives de la 2^{ème} génération (parcelles 20 en Cabernet franc, 23 et 24 en Merlot).

Les résultats sont présentés dans le tableau n°3.

Pour la première génération, nous avons calculé les sommes thermiques en base 0 aux différents stades phénologiques en commençant le cumul à partir du 60^{ème} jour de l'année, soit le 1^{er} mars 2017, conformément au modèle GFV. Dans le cas de la 2^{ème} génération, nous avons estimé une date (le 26 mars 2017) pour commencer le cumul de sorte à ce que les sommes thermiques en base 0 à la véraison et la floraison soient similaires à celles obtenues pour la première génération.

Nous n'avons pas de données de température du 4 mars 2017 au 4 mai 2017 pour le capteur de la parcelle 20, ce pourquoi les valeurs de somme thermique en base 0 n'ont pas pu être calculées pour ce capteur.

2 - Comparaison des intervalles de temps entre stades phénologiques

La 2^{ème} génération de Cabernets francs a débourré 42 jours après la première ; les Merlots 50 jours après. Il est très intéressant de constater que l'écart de jours entre les deux générations d'un même cépage a fortement diminué entre le débourrement et la floraison puis est resté constant jusqu'à la véraison : la floraison et la véraison de la 2^{ème} génération de Cabernets francs ont eu lieu avec un décalage de 23 jours par rapport à la première génération ; 25 jours dans le cas des Merlots.

Nous nous attendions à ce que l'ensemble du cycle s'accélère du fait qu'il se faisait dans des conditions plus chaudes. La formation des inflorescences et leur floraison se sont effectivement déroulées plus rapidement que dans le cas de la 1^{ère} génération (20 jours de moins à partir du débourrement dans le cas des Cabernets francs ; 25 jours dans le cas des Merlots). En revanche la période floraison-véraison s'est déroulée avec le même pas de temps pour les deux générations : 64 jours en moyenne pour les Cabernets francs et 59 jours pour les Merlots.

3 - Comparaison des besoins thermiques des deux générations

Malgré les conditions plus chaudes, les valeurs des deltas de somme thermique en base 0 entre le débourrement et la floraison ont été beaucoup plus faibles dans le cas de la 2^{ème} génération que pour la première : en moyenne une diminution de 220°C.j (degrés jours) pour les Cabernets francs et 144°C.j pour les Merlots, soit une diminution respectivement de 11 et de 7 jours théoriques (si l'on considère une température moyenne de 20°C à la floraison).



Figure 27 : Photo de deux yeux re-débourrant grâce à leurs bourgeons secondaires et tertiaires après avoir été re-taillés suite au gel



Figure 28 : Photo d'un rameau de 2ème génération porteur d'une grappe en formation

En revanche, tout comme le nombre de jours, les valeurs des deltas de somme thermique en base 0 entre la floraison et la véraison sont similaires pour les deux générations.

Bien que jusqu'à la véraison le développement de la deuxième génération se soit déroulé dans des conditions plus chaudes, ce ne sera peut-être pas le cas pour sa maturation qui a commencé à partir du 16 et du 22 août, donc dans des conditions plus fraîches. Le peu de grappes sur les pieds marqués dans les parcelles représentatives de la 2^{ème} génération ne permet pas de faire des prélèvements réguliers pour suivre l'évolution des sucres. Il aurait été intéressant en effet de comparer les valeurs des deltas de nombre de jours et de somme thermique en base 0 entre la véraison et le stade « 200g/L » déterminé en dosant la concentration en sucres réducteurs des moûts, afin de voir si la cinétique évoluait.

4 - Limites de cette comparaison

La deuxième génération ne modélise pas exactement ce que serait le cycle de la vigne suite au réchauffement climatique. Non seulement la fin du cycle se produira dans des conditions plus fraîches comme mentionné plus haut, mais surtout la vigne a commencé son cycle en ayant subi un stress très important, certes le gel mais surtout la taille de nettoyage alors que la vigne avait déjà entamé ses réserves pour produire des rameaux. De plus, les bourgeons secondaires et tertiaires se sont parfois développés sur le même œil taillé (cf images 29 et 30). Le faible nombre de grappes portées par les pieds de deuxième génération ainsi que leur petite taille ont peut-être eu un effet sur leur cinétique de développement, notamment en modifiant le ratio feuille/fruit habituel. Enfin, la forte hétérogénéité de cette deuxième génération a conduit à un étalement des stades phénologiques ; de fait les dates calculées pour chaque stade ne représentent pas la réalité de chaque cep.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude avait pour objectif d'exploiter les données issues des différents dispositifs d'enregistrement de la température présents sur le domaine de Château Cheval Blanc afin de les confronter à des données agronomiques.

Elle devait nous permettre de mieux comprendre la variabilité spatiale de la température au sein du domaine, ainsi que d'étudier deux solutions d'adaptations proposées dans un contexte de réchauffement climatique (rehaussement de la tête du tronc et enherbement) et également d'analyser l'évolution et la répartition de la température lors des nuits de gel d'avril ainsi que les conséquences sur le développement de la vigne.

Nous avons ainsi pu mettre en évidence que la température moyenne a effectivement augmenté depuis les années 1950 sur le domaine. Parmi les facteurs influençant la température, nous avons montré un effet significatif du type de sol et de l'altitude, en revanche nous avons écarté l'influence du cépage et de la latitude dans le contexte de ce vignoble.

D'autre part nous avons pu conclure qu'il existe une différence significative entre les températures relevées par les capteurs utilisés dans le cadre de ce projet et une station météorologique classique. De fait, les indices bioclimatiques calculés à partir de données de capteurs ne sont pas comparables aux indices classiques calculés à partir de stations météorologiques. De plus la végétation dans l'environnement proche d'un capteur pourrait aussi avoir un impact sur les températures relevées.

Nous avons également pu montrer l'existence d'un gradient thermique vertical à l'échelle de la hauteur du feuillage significatif notamment pour les températures maximales et moyennes, la température diminuant avec l'altitude. Mais nous avons aussi montré que ce gradient pouvait être inversé du fait d'autres facteurs climatiques (rayonnement, vent, nébulosité...). De plus, nous avons mis en évidence que, comparativement à un sol labouré, un sol enherbé était plus frais, mais que l'impact du travail du sol sur la température diminuait avec l'altitude. De fait, dans un contexte de réchauffement climatique où l'on chercherait à retarder la maturité, il pourrait être intéressant de réfléchir à augmenter les hauteurs des troncs et à enherber les parcelles.

Quant au gel d'avril, nous avons pu montrer que des inversions thermiques avaient eu lieu ces quatre nuits-là, l'air froid et dense restant proche du sol et stagnant dans les contre-bas du microrelief. Les températures minimales étaient d'autant plus basses que les parcelles étaient enherbées (plutôt que labourée) et sur des sables (plutôt que sur des grèves ou des argiles). Après la taille de nettoyage, la deuxième génération de rameaux a débourré environ 45 jours après le débourrement de la première génération. Cet écart a diminué pour atteindre environ 24 jours entre les floraisons des deux générations, et s'est maintenu entre les deux véraisons.

L'ensemble de ces résultats a permis de réfléchir à l'optimisation de la répartition des capteurs au sein du domaine en fonction des besoins en données de températures à la fois pour les suivis réguliers menés sur les placettes mais également en fonction des futures études qui pourraient être menées sur le domaine.

En plus de replacer les capteurs au niveau des placettes-terroir, il serait intéressant de les placer à 45cm, au niveau du fil porteur. Ainsi les températures relevées renseigneraient sur le microclimat de la vigne (hauteur des bourgeons, hauteur moyenne des grappes).

Le nouveau dispositif ayant pour but de comparer les capteurs à une station météorologique classique ainsi que d'étudier l'influence de la végétation sur les températures relevées permettrait peut-être d'établir la relation entre ces deux types d'équipements.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amerine, M. A., & Winkler, A. J. (1944). *Composition and quality of musts and wines of California grapes*. *Hilgardia*, 15(6), pp 493-673.
- Bois, B. (2007). *Cartographie agroclimatique à méso-échelle: méthodologie et application à la variabilité spatiale du climat en Gironde viticole. Conséquences pour le développement de la vigne et la maturation du raisin*. Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 212 pages.
- Cleland, E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H., & Schwartz, M. (2007). *Shifting plant phenology in response to global change*. *Trends in Ecology and Evolution*, 22, pp 357-365.
- Coombe, B. G. (1987). *Influence of temperature on composition and quality of grapes*. *Acta Horticulturae*, 206, pp 23-26.
- Duchêne, E., & Schneider, C. (2005). *Grapevine and climatic changes: A glance at the situation in Alsace*. *Agronomy for Sustainable Development*, 25, pp 93-99.
- Duchêne, E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C., & Merdinoglu, D. (2010). *The challenge of adapting grapevine varieties to climate change*. *Climate Research*, 41, pp 193-204.
- Finger, S. (2015). *Château Cheval Blanc*. Château Cheval Blanc 2015, 110 pages.
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., & Santos, J. A. (2012). *An overview of climate change impacts on European viticulture*. *Food and Energy Security*, 1(2), pp 94-110.
- Friend, A. P., & Trought, M. C. (2007). *Delayed winter spur-pruning in New Zealand can alter yield components of Merlot grapevines*. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 13(3), pp 157-164.
- Füssel, H. M. (2007). *Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons*. *Sustainability science*, 2(2), pp 265-275.
- Hall, A., & Jones, G. V. (2009). *Effect of potential atmospheric warming on temperature-based indices describing Australian winegrape growing conditions*. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 15(2), pp 97-119.
- Hannah, L., Roehrdanz, P. R., Ikegami, M., Shepard, A. V., Shaw, M. R., Tabor, G., et al. (2013). *Climate change, wine, and conservation*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(17), pp 6907-6912.
- Huglin, P. (1978). *Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole*. *Comptes Rendus de l'Académie de l'Agriculture de France*, 64, pp 1117-1126.
- Jones, G. V., & Davis, R. E. (2000). *Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France*. *American Journal of Enology and Viticulture*, 51(3), pp 249-261.
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2005). *Climate change and global wine quality*. *Climatic change*, 73(3), pp 319-343.
- Jones, G., & Davis, R. (2000). *Climate influences on grapevine phenology, grape composition and wine production and quality for Bordeaux, France*. *American Journal of Enology and Viticulture*, 51, pp 249-261.

- Keller, M. (2010). *Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturists*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 16, pp 56-69.
- Le Roux, R., de Rességuier, L., Katurji, M., PeymanZawar-Reza, L. D., Sturman, A., Van Leeuwen, C., et al. (2016). *A fine scale approach to map bioclimatic indices using and comparing dynamical and geostatistical methods*. In Terroir Congress, Oregon (USA), 15 pages.
- Legault, M. (2014). *Types de temps et circulations atmosphériques : impact sur la variabilité spatiale des températures dans les vignobles du Libournais*. Mémoire de fin d'études, Université de Rennes 2, 36 pages.
- Lorenz, D., Eichhorn, K., Bleiholder, H., Klose, R., Meier, U., & Weber, E. (1995). *Growth Stages of the Grapevine: Phenological growth stages of the grapevine (Vitis vinifera L. ssp. vinifera)—Codes and descriptions according to the extended BBCH scale*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 1, pp 100-103.
- Madelin, M. (2004). *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : Modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air*. Thèse de doctorat, Université Paris VII, 412 pages.
- Martínez-Lüscher, J., Morales, F., Sánchez-Díaz, M., Delrot, S., Aguirreolea, J., Gomès, E., et al. (2015). *Climate change conditions (elevated CO₂ and temperature) and UV-B radiation affect grapevine (Vitis vinifera cv. Tempranillo) leaf carbon assimilation, altering fruit ripening rates*. Plant Science, 236, pp 168–176.
- Mori, K., Goto-Yamamoto, N., Kitayama, M., & Hashizume, K. (2007). *Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature*. Journal of Experimental Botany, 58(8), pp 1935–1945.
- Neethling, E. (2016). *Adaptation de la viticulture au changement climatique: vers des stratégies à haute résolution*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 2, 204 pages.
- Neethling, E., Petitjean, T., Quénot, H., & Barbeau, G. (2017). *Assessing local climate vulnerability and winegrowers' adaptive processes in the context of climate change*. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 22(5), pp 777-803.
- Oke, T. R. (1978). *Boundary Layer Climates*. Methuen, London, 372 pages.
- Ollat, N., & Touzard, J. M. (2014). *Impacts and adaptation to climate change: new challenges for the French wine industry*. Journal International des Sciences de la Vigne et du vin, spécial LACCAVE, pp 77-80.
- Ollat, N., & Touzard, J.-M. (2013). *Projet LACCAVE. Impacts du changement climatique et adaptations de la filière viti-vinicole*. Premières Assises des Vins du Sud-Ouest, le 10/12/2013, Toulouse, France, pp 20.
- Ollat, N., Touzard, J. M., & Van Leeuwen, C. (2016). *Climate change impacts and adaptations: New challenges for the wine industry*. Journal of Wine Economics, 11(1), pp 139-149.
- Pachauri, R., Meyer, L., & (eds). (2014). *IPCC, 2014 : Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, pp 151.
- Parker, A., Garcia de Cortázar-Atauri, I., Chuine, I., Barbeau, G., Bois, B., Boursiquot, J.-M., et al. (2013). *Classification of varieties for their timing of flowering and veraison*

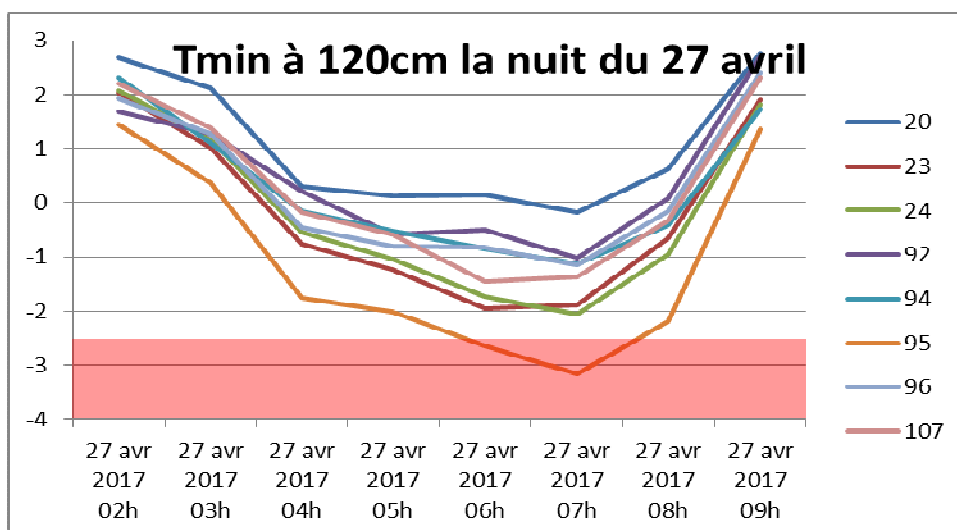
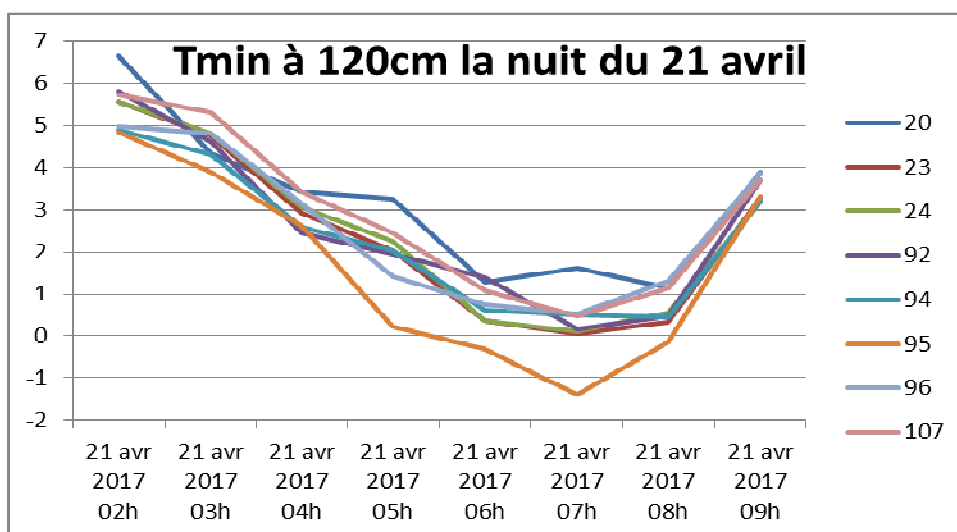
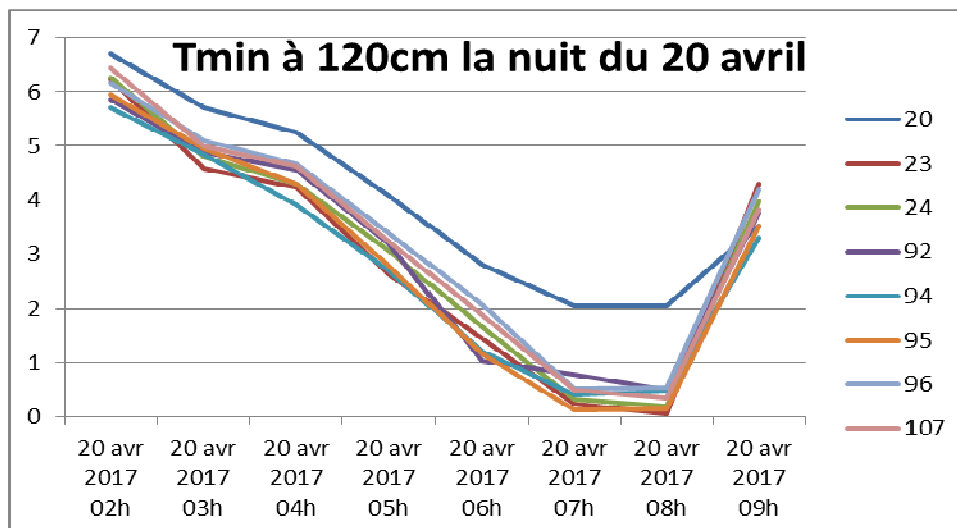
- using a modelling approach: A case study for the grapevine species Vitis vinifera L.* Agricultural and Forest Meteorology, 180, pp 249–264.
- Parker, A., Garcia de Cortázar-Atauri, I., Van Leeuwen, C., & Chuine, I. (2011). *General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of Vitis vinifera L.* Australian Journal of Grape and Wine Research, 17(2), pp 206–216.
- Pieri, P. (2007-2010). *Changement climatique et culture de la vigne: l'essentiel des impacts.* Le Livre Vert du projet CLIMATOR, Ademe ed, pp 213-223.
- Pratt, C. (1971). *Reproductive anatomy in cultivated grapes-a review.* American Journal of Enology and Viticulture, 22(2), pp 92-109.
- Quénol, H. (2014). *Changement climatique et terroirs viticoles.* Paris : Tec & Doc, Lavoisier.
- Quénol, H., Barbeau, G., Madelin, M., Boulanger, J.-P., & Tissot, C. (2010). *Compte-rendu final TERDAKLIM.* APR 2010, 62 pages.
- Reynolds, A. G., & Heuvel, J. E. (2009). *Influence of grapevine training systems on vine growth and fruit composition: a review.* American Journal of Enology and Viticulture, 60(3), pp 251-268.
- Sadras, V., & Petrie, P. (2011). *Climate shifts in south-eastern Australia: early maturity of Chardonnay, Shiraz and Cabernet Sauvignon is associated with early onset rather than faster ripening.* Australian Journal of Grape and Wine Research 17(2) pp 199-205.
- Sadras, V., Petrie, P., & Moran, M. (2013). *Effects of elevated temperature in grape-vine. II juice pH, titratable acidity and wine sensory attributes.* Australian Journal of Grape and Wine Research, 19, pp 107–115.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., et al. (2013). *IPCC, 2013 : Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 1535.
- Tonietto, J., & Carbonneau, A. (2004). *A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide.* Agricultural and Forest Meteorology, 124 (1/2), pp 81-97.
- Van Leeuwen, C., & Darriet, P. (2016). *The impact of climate change on viticulture and wine quality.* Journal of Wine Economics, 11(1), pp 150-167.
- Van Leeuwen, C., & Destrac-Irvine, A. (2017). *Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard.* OENO One, 51(2), pp 147-154.
- Van Leeuwen, C., & Seguin, G. (2006). *The concept of terroir in viticulture.* Journal of Wine Research, 17(1), pp 1–10.
- Van Leeuwen, C., Schultz, H., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Duchêne, E., Ollat, N., Pieri, P., et al. (2013). *Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050.* Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110(33), pp 3051–3052.
- Vasconcelos, M., Greven, M., Winefield, C., Trought, M., & Raw, V. (2009). *The flowering process of Vitis vinifera: a review.* American Journal of Enology and Viticulture, 60(4), pp 411-434.

ANNEXES

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des moyennes de températures (Tmin, Tmax, Tmoy) et écarts à la moyenne (EcartTmin, EcartTmax, EcartTmoy) sur trois pas de temps (Année, Saison Végétative, Eté) en fonction du type de sol (G = Graves ; S = Sables ; A = Argiles) et du cépage (M = Merlot ; CF = Cabernet franc) de 2013 à 2016.

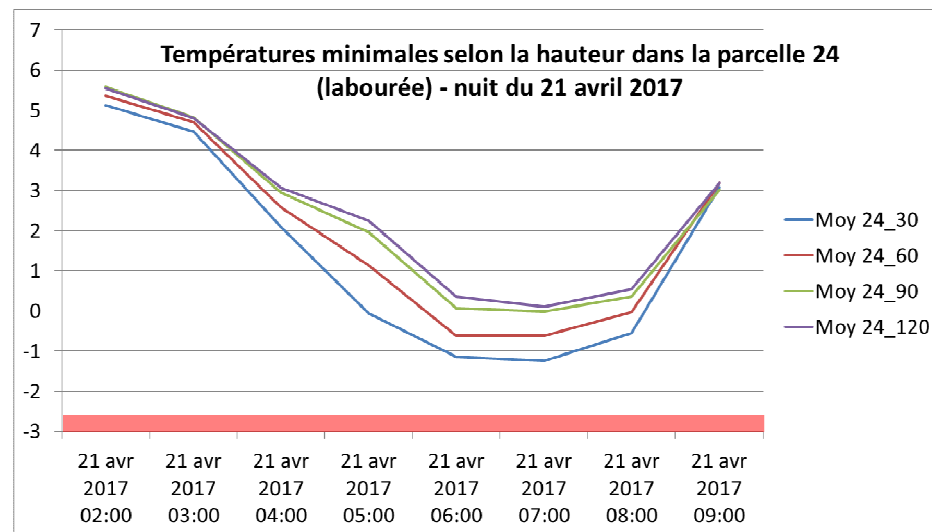
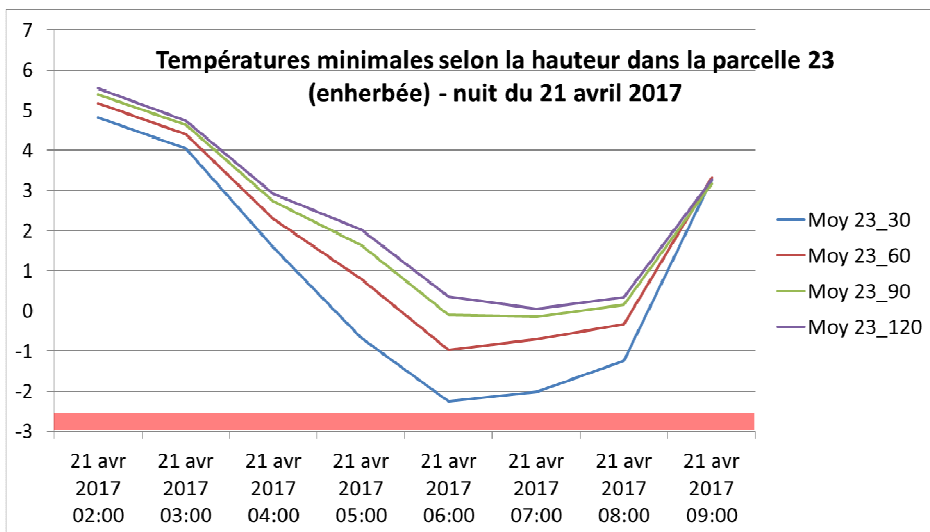
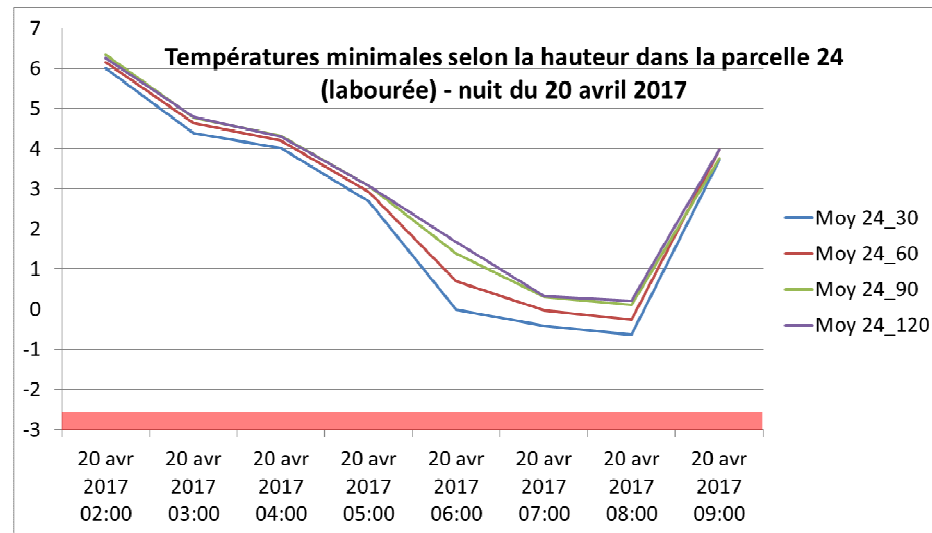
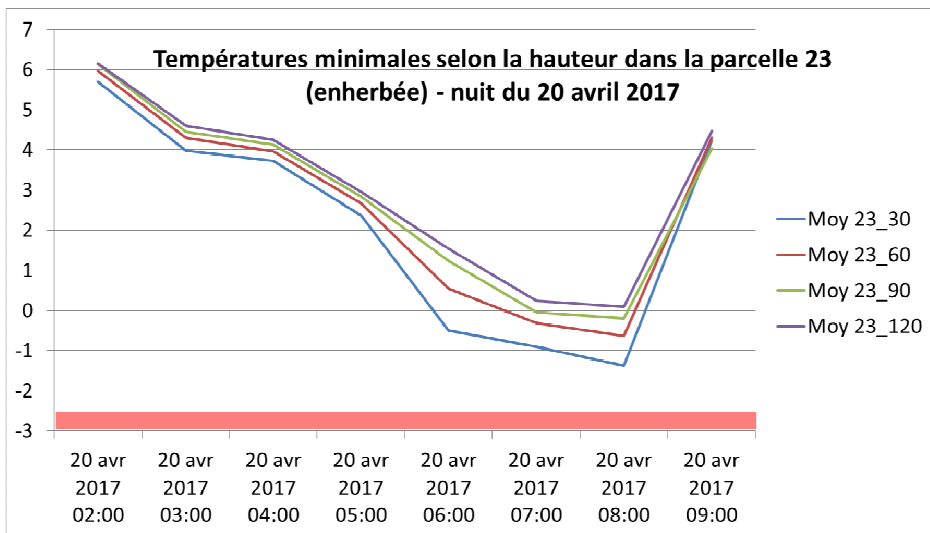
Le surlignage coloré représente la significativité mise en évidence par ANOVA (Vert : p<0.1 ; Jaune : p<0.05 ; Orange : p<0.01 ; Rouge : p<0.001). Les valeurs en caractères gras traduisent un écart de moyennes supérieur à 0.08°C soit le double de la sensibilité des capteurs.

		2013					2014					2015					2016				
		SOL			CEPAGE		SOL			CEPAGE		SOL			CEPAGE		SOL			CEPAGE	
		G	S	A	M	CF	G	S	A	M	CF	G	S	A	M	CF	G	S	A	M	CF
Tmin moy	Année	8,54	8,16	8,47	8,25	8,53	9,60	9,23	9,64	9,46	9,54	8,77	8,45	8,88	8,56	8,87	8,73	8,01	8,59	8,13	8,61
	Sais vég	12,23	11,74	12,14	11,90	12,18	12,63	12,00	12,44	12,57	12,38	12,35	11,75	12,37	12,06	12,22	12,23	11,08	11,99	11,51	11,87
	Eté	14,84	14,00	14,64	14,43	14,56	14,22	13,54	14,13	14,09	14,00	13,92	13,23	13,94	13,57	13,77	13,79	12,13	13,46	12,81	13,23
Tmax moy	Année	19,29	19,67	19,37	19,34	19,55	21,05	21,08	21,05	21,22	21,01	21,21	21,23	21,08	21,23	21,07	20,47	20,57	20,55	20,45	20,58
	Sais vég	24,88	25,28	24,91	24,95	25,09	26,12	26,13	25,92	26,41	25,95	27,42	27,31	27,14	27,46	26,97	26,38	26,23	26,39	26,32	26,32
	Eté	29,37	29,79	29,40	29,51	29,53	28,55	28,58	28,20	29,07	28,27	29,84	29,62	29,41	29,81	29,23	30,67	30,53	31,10	30,58	30,78
Tmoy moy	Année	13,91	13,91	13,92	13,79	14,04	15,33	15,16	15,34	15,34	15,27	14,99	14,84	14,98	14,90	14,97	14,60	14,29	14,57	14,29	14,59
	Sais vég	18,55	18,51	18,52	18,42	18,63	19,37	19,07	19,18	19,49	19,17	19,88	19,53	19,75	19,76	19,59	19,31	18,65	19,19	18,91	19,10
	Eté	22,11	21,90	22,02	21,97	22,05	21,39	21,06	21,17	21,58	21,14	21,88	21,43	21,67	21,69	21,50	22,23	21,33	22,28	21,69	22,00
EcartTmin moy	Année	0,15	-0,23	0,08	-0,14	0,14	0,09	-0,29	0,12	-0,06	0,02	0,08	-0,23	0,19	-0,12	0,18	0,31	-0,40	0,18	-0,29	0,19
	Sais vég	0,20	-0,30	0,10	-0,14	0,14	0,20	-0,42	0,02	0,14	-0,05	0,23	-0,37	0,25	-0,07	0,10	0,51	-0,64	0,27	-0,22	0,14
	Eté	0,35	-0,49	0,14	-0,07	0,07	0,19	-0,49	0,11	0,07	-0,02	0,27	-0,42	0,29	-0,08	0,12	0,73	-0,93	0,40	-0,26	0,17
EcartTmax moy	Année	-0,15	0,23	-0,07	-0,11	0,08	-0,01	0,02	-0,01	0,16	-0,05	0,04	0,06	-0,08	0,07	-0,10	-0,06	0,05	0,02	-0,08	0,05
	Sais vég	-0,14	0,26	-0,11	-0,07	0,05	0,05	0,06	-0,15	0,35	-0,12	0,15	0,05	-0,12	0,19	-0,29	0,06	-0,10	0,07	0,00	0,00
	Eté	-0,15	0,27	-0,12	-0,01	0,01	0,08	0,11	-0,27	0,59	-0,20	0,26	0,04	-0,17	0,23	-0,35	-0,03	-0,17	0,40	-0,12	0,08
EcartTmoy moy	Année	0,00	0,00	0,00	-0,12	0,12	0,04	-0,13	0,06	0,05	-0,02	0,06	-0,09	0,06	-0,03	0,04	0,13	-0,18	0,10	-0,18	0,12
	Sais vég	0,03	-0,02	-0,01	-0,10	0,10	0,12	-0,18	-0,07	0,24	-0,08	0,19	-0,16	0,06	0,06	-0,10	0,29	-0,37	0,17	-0,11	0,07
	Eté	0,10	-0,11	0,01	-0,04	0,04	0,14	-0,19	-0,08	0,33	-0,11	0,26	-0,19	0,06	0,08	-0,12	0,35	-0,55	0,40	-0,19	0,12

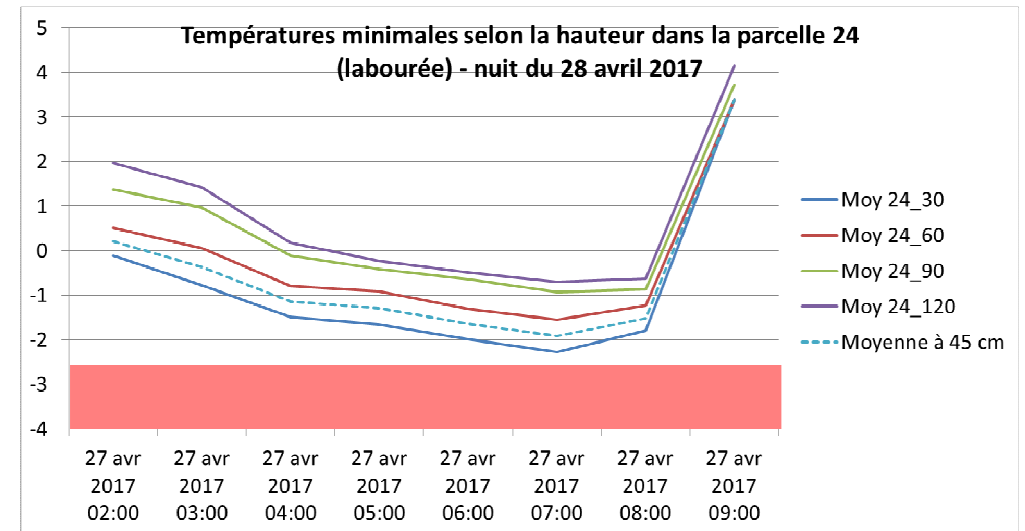
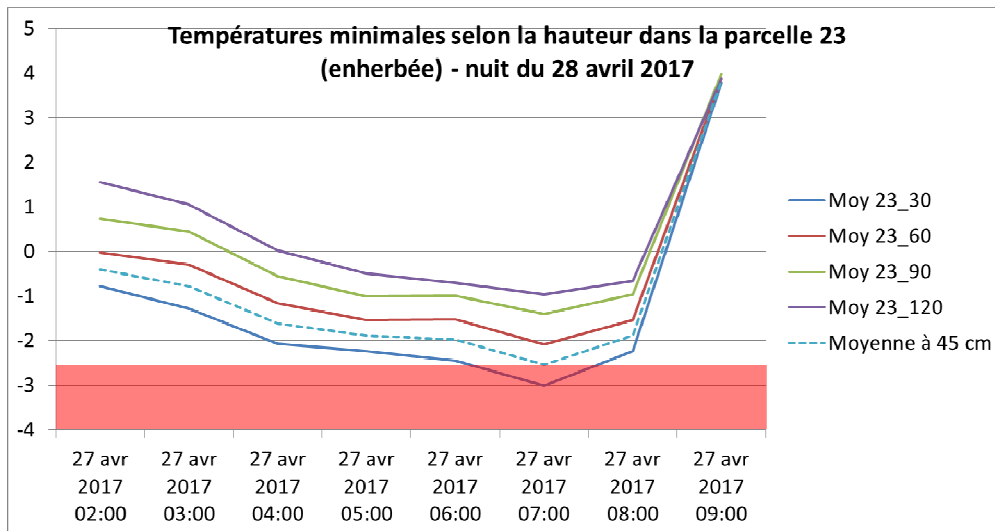
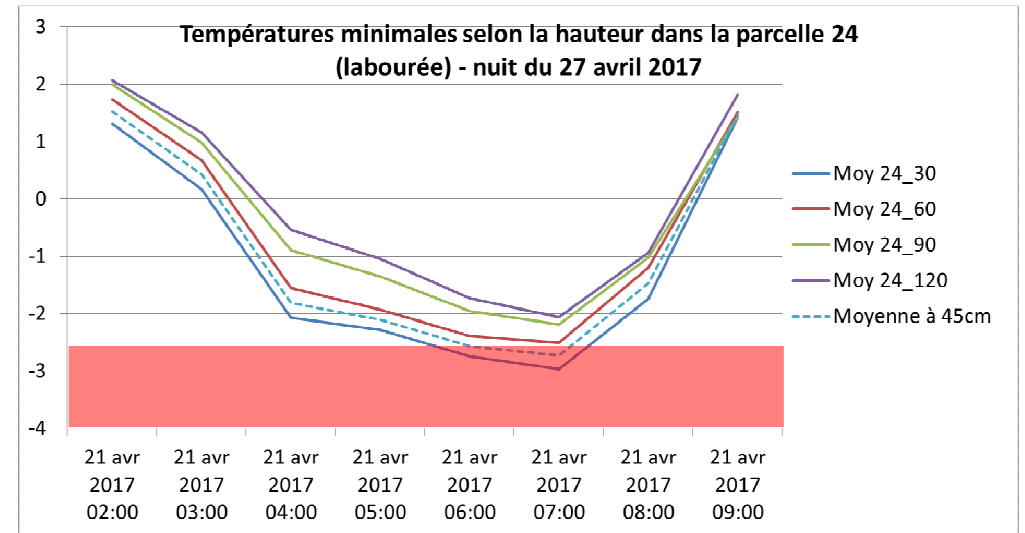
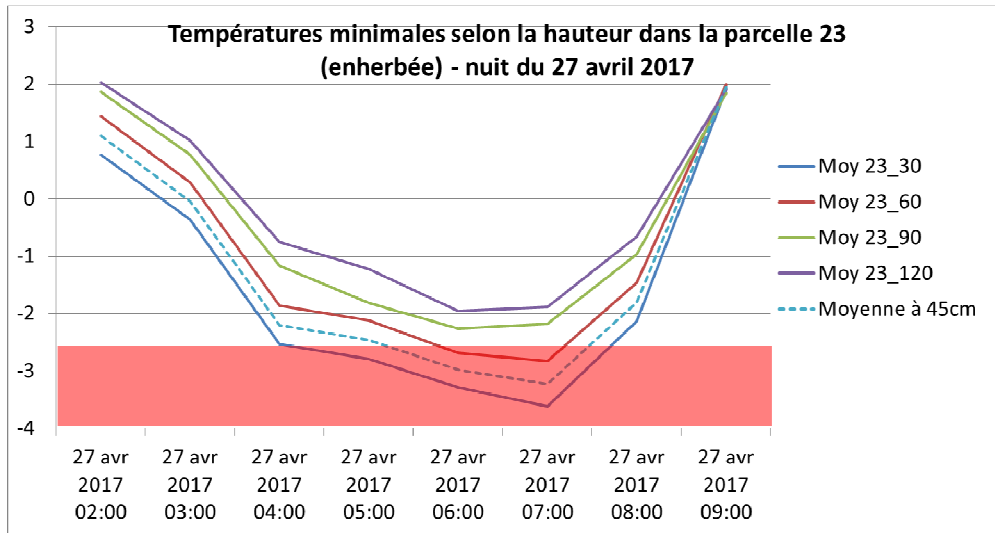


Annexe 2 : Evolution de la température minimale (en °C) au niveau des capteurs à 120cm de 02h à 09h au cours des nuits du 20 (en haut), du 21 (au milieu) et du 27 avril 2017 (en bas).

La zone rouge représente la plage des températures inférieures) -2.5°C, valeur-seuil pour le gel des bourgeons.



Annexe 3 : Evolution de la température minimale en fonction de la hauteur (30, 60, 90 et 120cm) de 02h à 09h au cours des nuits du 20 (en haut) et 21 avril 2017 (en bas) au niveau de la parcelle 23 (enherbée ; à gauche) et de la parcelle 24 (labourée, à droite).
 La zone rouge représente la plage des températures inférieures) -2.5°C, valeur-seuil pour le gel des bourgeons.



Annexe 4 : Evolution de la température minimale en fonction de la hauteur (30, 60, 90 et 120cm) de 02h à 09h au cours des nuits du 27 (en haut) et 28 avril 2017 (en bas) au niveau de la parcelle 23 (enherbée ; à gauche) et de la parcelle 24 (labourée, à droite).

La zone rouge représente la plage des températures inférieures) -2.5°C, valeur-seuil pour le gel des bourgeons.

Influence de la température sur le comportement de la vigne dans le contexte du domaine Château Cheval Blanc.

Résumé :

Le Château Cheval Blanc est un domaine viticole historique de l'appellation Saint-Emilion. Conscient des enjeux du changement climatique, son vignoble est équipé depuis quelques années de nombreux capteurs de température.

Cette étude a visé à exploiter les données issues de ces capteurs et à les mettre en relation avec les données agronomiques relevées sur le terrain.

Nous avons ainsi pu étudier l'occurrence des stades phénologiques de la vigne en rapport avec des calculs de sommes thermiques, ainsi que l'impact du travail du sol (enherbement/labour) sur la température ou encore le gradient thermique vertical. Ceci nous a permis de valider l'hypothèse qu'un rehaussement de la tête des ceps associé à l'enherbement de la parcelle permettrait de diminuer la température moyenne au niveau des grappes et donc retarder la maturité de quelques jours.

Le gel d'avril 2017 a mené à deux autres études, l'une portant sur la répartition horizontale et verticale de la température lors de ces quatre nuits, l'autre sur la phénologie de la seconde génération de rameaux qui a débourré suite au gel, donc dans un contexte plus chaud. Nous avons ainsi pu tester le modèle GFV (Grapevine Floraison-Veraison model) pour chaque génération et montrer que les besoins thermiques d'un cépage pour arriver à la véraison sont globalement constants quelle que soit la date de débourrement.

Mots-clés : Cheval Blanc, température, capteur, phénologie, hauteur, gel, génération

Influence of temperature on grapevine behaviour in Château Cheval Blanc vineyard.

Abstract:

Château Cheval Blanc is an historical wine estate of Saint-Emilion. Well aware of the issue of global change, its vineyard was equipped a few years ago with temperature sensors.

The aim of this study was to exploit the data collected from the sensors and compare them with agronomic data collected in the field.

We have compared the occurrence of the phenological stages of the vine with calculations of temperature sums; we have studied the impact of soil management (cover crops or tillage) on temperature; we also have studied the vertical thermal gradient. We were able to approve the hypothesis we had made that raising the height of the trunks and covering the soil with grass could lower the average temperature in the cluster area which could lead to delay the maturity of a few days.

The frost that happened in April 2017 led to two others studies. The first one relates to the horizontal and vertical temperature distribution during these four nights. The other one concerns the second generation of shoots which burst after the frost so in warmer conditions. We have tested the GFV model (Grapevine Floraison-Veraison model) for each generation and we have pointed out that for one grape variety the thermal needs to achieve its veraison remain the same regardless of the date of budburst.

Keywords : Cheval Blanc, temperature, sensor, phenology, height, frost, generation