



HAL
open science

Mise en place d'un protocole de traitement de données pour l'étude de l'adaptation d'une large gamme de cépages aux évolutions climatiques en Bordelais

Louise Durand

► To cite this version:

Louise Durand. Mise en place d'un protocole de traitement de données pour l'étude de l'adaptation d'une large gamme de cépages aux évolutions climatiques en Bordelais. Sciences agricoles. 2012. dumas-00772947

HAL Id: dumas-00772947

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00772947>

Submitted on 11 Jan 2013

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.



AGROCAMPUS OUEST

CFR Rennes*

65, rue de Saint-Brieuc
35000 Rennes

ISVV, UMR EGFV
210, chemin de Leysotte
33140 Villenave d'Ornon

Mémoire de Fin d'Études*

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences
Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage ***

Année universitaire* : 2011-2012

Spécialisation ou option* : Statistique appliquée

**MISE EN PLACE D'UN PROTOCOLE DE TRAITEMENT DE DONNEES POUR
L'ETUDE DE L'ADAPTATION D'UNE LARGE GAMME DE CEPAGES AUX
EVOLUTIONS CLIMATIQUES EN BORDELAIS**

Par : L. DURAND

Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation*
définitive)

Bon pour dépôt (version

Date : .../.../... Signature :

Autorisation de diffusion : Oui Non

Devant le jury :

Soutenu à RENNES le* 07/09/2012

Sous la présidence de* :

Maître de stage* : C. van Leeuwen

Enseignant référent : Julie Josse

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :

*"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent
que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".*

* champs obligatoires



MISE EN PLACE D'UN PROTOCOLE DE TRAITEMENT DE DONNEES POUR L'ETUDE DE L'ADAPTATION D'UNE LARGE GAMME DE CEPAGES AUX EVOLUTIONS CLIMATIQUES EN BORDELAIS

Stage réalisé sous la direction de C. van Leeuwen et A. Destrac-Irvine à l'UMR Ecophysiologie et Génomique Fonctionnelle de la Vigne (EGFV) située à l'Institut des Sciences de la Vigne et du Vin de l'Université de Bordeaux en collaboration avec l'UE viticole

Mémoire de fin d'études

Diplôme d'Ingénieur agronome AGROCAMPUS Ouest
& Master Statistique appliquée Université de Haute Bretagne
(Rennes 2)

L. Durand
Année 2012

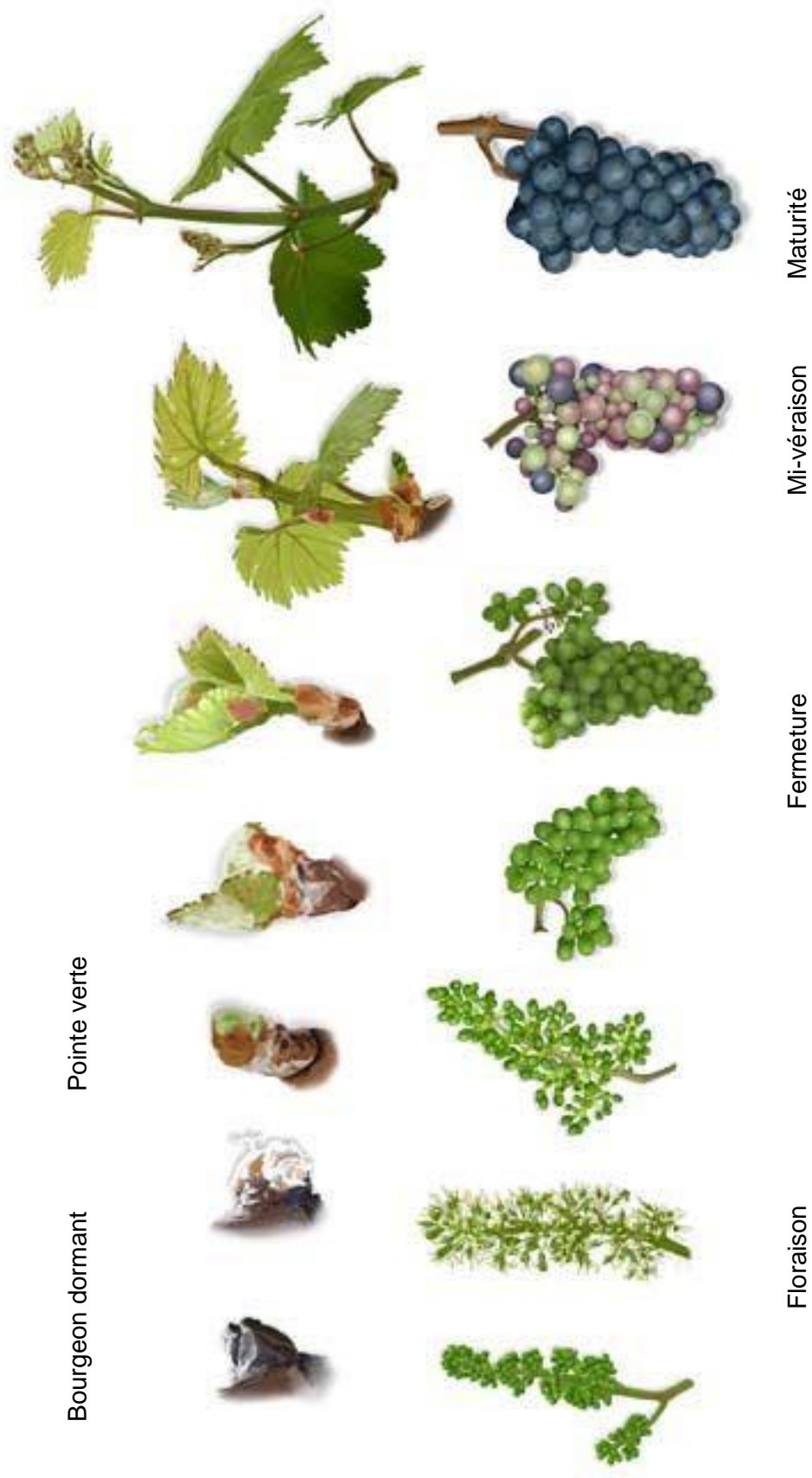


Figure 1 : Stades phénologiques de la vigne représentés au cours du temps (<http://storage.canalblog.com/44/78/479568/54650963.jpg>)

Table des matières

INTRODUCTION : Contexte et enjeux	9
I. Bibliographie générale : phénologie de la vigne et changement climatique	13
A. Phénologie de la vigne	13
1. Les différents stades phénologiques de la vigne	13
2. Etat des lieux rapide des modèles de phénologie existants	13
a) Modèles sur le débourrement	13
b) Modèles sur floraison et véraison	15
c) Modèles sur la maturation	15
3. Intérêt des modèles phénologiques dans un contexte de changement climatique	17
B. Changement climatique, scénarios globaux et locaux	17
1. Effets sur la vigne, le vin	17
2. En Bordelais	19
II. Essai phénotypage	21
A. Présentation de l'expérimentation – problématique précise	21
B. Données de phénologie : débourrement, floraison et véraison	23
1. Tableaux de données et sorties graphiques par année	23
2. Analyse de variance	25
C. Etude de la maturation	27
1. Caractérisation des courbes de maturation en sucres à l'aide d'un modèle non-linéaire sur un jeu de données complémentaire	27
a) Présentation des données supplémentaires utilisées	27
b) Ajustements de modèles pour l'accumulation des sucres	29
(1) Description des modèles envisagés	29
(2) Performances et choix d'un modèle	31
(a) Qualité d'ajustement	31
(b) Valeur et interprétabilité des paramètres estimés	33
(c) Critères computationnel et pratique	33
(3) Bilan	33
2. Application à l'essai phénotypage	33
a) Protocole de suivi de la maturation	35
b) Caractérisation des cépages à l'aide du modèle retenu pour la cinétique des sucres réducteurs	37
c) Caractérisation analytique des moûts à surmaturité	37
D. Analyses à prévoir	41
III. Calibration de l'analyseur IRTF	45

A.	Contexte.....	45
B.	Notion de calibration.....	45
C.	Présentation des données et des méthodes	45
1.	Données disponibles.....	45
2.	Examen de la collection spectrale par une ACP :.....	47
3.	Méthodes de calibration.....	47
a)	Méthodes prédictives en spectroscopie.....	47
b)	Utilisation de la régression sur composantes principales (PCR).....	49
c)	Utilisation de la régression PLS.....	49
D.	Mise en œuvre de méthodes prédictives pour l'étalonnage de l'analyseur : l'exemple de l'acidité titrable (AT).....	49
1.	Comparaison PCR/PLS	49
2.	Etalonnage	51
3.	Validation sur un échantillon indépendant.....	51
4.	Présélection des zones spectrales utilisées pour la PLS.....	51
E.	Comparaison avec la calibration commerciale.....	53
IV.	Ouverture sur des aspects sensoriels du vin	55
A.	Bibliographie, analyse des correspondances sur les arômes.....	55
B.	Pistes pour le recueil et le traitement.....	57
	Conclusion et discussion générale.....	59

Table des figures

Figure 1 : Stades phénologiques de la vigne représentés au cours du temps (http://storage.canalblog.com/44/78/479568/54650963.jpg).....	2
Figure 2 : Evolution de la date de floraison du Chasselas dans trois vignobles français : Bordeaux (Aquitaine), Colmar (Alsace), et Marseillan (Languedoc-Roussillon) (base de données Phénoclim) .	8
Figure 3 : Note des millésimes des Médoc et Graves en fonction de la température moyenne pendant la période de développement (Jones <i>et al.</i> 2005).....	8
Figure 4 : Extrait des échelles d'Eichhorn et Lorentz (à gauche), et de Baggiolini (à droite) caractérisant les stades phénologiques de la vigne (http://www.agroscope.admin.ch/data/publikationen/ch_08_pub_RSVH_40_6_I-IV_f.pdf)	12
Figure 5 : Principe du modèle phénologique avec levée de dormance (Landais, 2007) (https://www.supagro.fr/pollen/index.php?option=com_content&task=view&id=59&Itemid=203).....	12
Figure 6 : Courbes théoriques montrant l'évolution de la concentration en sucres, acides organiques, anthocyanes et tanins dans la baie (Deloire, 2008)	14
Figure 7 : Anomalies de température en Europe pour le climat de 2050 telles que simulées par le multi modèle du GIEC (source : Livre Vert du Projet Climator).....	18
Figure 8 : Dispositif expérimental de 13 piquetées de 5 pieds sur 42 rangs. Répartition aléatoire des 52 variétés sur les 5 blocs.....	20
Figure 9 : Grappe de vigne en cours de floraison - la Grande Ferrade, Mai 2012, Durand.....	22
Figure 10 : Classement des cépages par somme de températures (base 0°C jour 0) de mi-floraison moyenne 2012 (~10 individus statistiques par cépage).....	22
Figure 11 : Evolution de 8 variables mesurées au cours de la maturation 2011 pour le cépage Carmenère N. (Ref : mesure de référence ; WS : WineScan)	26
Figure 12 : Représentation de la dynamique du taux de sucres réducteurs dans les baies de trois cépages (CF : Cabernet franc, CS : Cabernet-Sauvignon, Mt : Merlot) sur 15 ans dans une propriété viticole du Bordelais	28
Figure 13 : Exemple d'un ajustement du modèle SADRAS (Cabernet franc en 2010 sur 3 sols : Argile (A), Graves (G), et Sable (S)).....	30
Figure 14 : Exemple d'un ajustement du modèle hyperbole (Cabernet franc en 2010 sur 3 sols : Argile (A), Graves (G), et Sable (S)).....	30
Figure 15 : Boxplots des paramètres Smax ajustés par les modèles Sadras (à gauche) et hyperbole (à droite)	32
Figure 16 : Ajustement du modèle SADRAS aux données de concentration en sucres réducteurs (g/L) (WineScan) obtenues sur le cépage Rkatsiteli B au cours de la campagne 2011 de l'essai phénotypage (5 réplicats).....	34
Figure 17 : Ajustement du modèle SADRAS aux données de concentration en sucres réducteurs (g/L) (WineScan) obtenues sur le cépage Pinot Noir au cours de la campagne 2011 de l'essai phénotypage (5 réplicats).....	34
Figure 18 : Graphe des individus de l'ACP réalisée sur les variables d'analyse derniers relevés 2011 pour les cépages blancs	38
Figure 19 : Graphe des variables de l'ACP réalisée sur les variables d'analyse derniers relevés 2011 pour les cépages blancs	38
Figure 20: Boxplot des sucres réducteurs en fonction du cépage dans les moûts des cépages blancs au dernier prélèvement 2011	40
Figure 21 : Représentation de toutes les sommes de température de mi-stade disponibles par placette : débourrement, floraison et véraison en 2011 et 2012	42
Figure 22 : Visualisation de 50 spectres d'absorbance avec le spectre moyen et les écarts types sur les échantillons de la campagne 2011	44

Figure 23 : Graphe des individus de l'ACP réalisée sur les données spectrales des échantillons 2011, colorié par date	46
Figure 24 : Somme des carrés des écarts de prédiction en fonction du nombre de composantes introduites dans des modèles PCR et PLS pour la variable acidité titrable.....	48
Figure 25 : Acidité totale prédite par la calibration commerciale en fonction de l'acidité totale mesurée, coloriée par date de récolte	52
Figure 26 : Barplot du nombre d'arômes contenus dans la variable textuelle des cépages blancs..	54
Figure 27 : Graphique de l'AC de la variable textuelle de niveau 3 sur les cépages blancs.....	56

Abréviations

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

IRTF : Infra Rouge à Transformée de Fourier

ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique

PERPHECLIM : PERennial fruit crops and forest PHEnology evolution facing to CLIMatic change

STICS : Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard : modèle de fonctionnement des cultures à pas de temps journalier simulant les conséquences des variations du milieu et du système de culture sur la production d'une parcelle agricole et sur l'environnement.

Glossaire

Cépage : Le cépage correspond à la variété du greffon (voir Porte-greffe et greffon). Il en existe près de cinq mille dans le monde, bien que seules quelques centaines soient aptes à produire du vin. Douze cépages sont actuellement autorisés dans les appellations produisant du vin dans le Bordelais. (www.vignesetvins.com)

Clone : Les vignes cultivées sont le résultat d'une sélection clonale. Pour les principaux cépages, il existe un ou plusieurs clones homologués et commercialisés.

Porte-greffe et greffon : Depuis l'invasion du phylloxera (puceron agissant au niveau des racines) vers 1860, les pieds de vigne sont greffés dans la grande majorité des pays viticoles. Le porte-greffe, résistant au phylloxera, constitue la partie racinaire et alimente en sève le greffon. Ce dernier, espèce européenne *Vitis vinifera*, constitue la variété cultivée reconnue pour la qualité de ses raisins et des vins dont ils sont issus.

Terroir : Selon l'OIV (Organisation Internationale de la Vigne et du Vin), le « TERROIR » vitivinicole est 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 confère 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.

Vinification : Transformation du jus de raisin en vin. Elle se décompose en plusieurs étapes dont la plus importante est la fermentation alcoolique à l'aide de levures. Il existe différents types de vinification, selon le type de vin recherché (rouge, blanc, effervescent, ...).

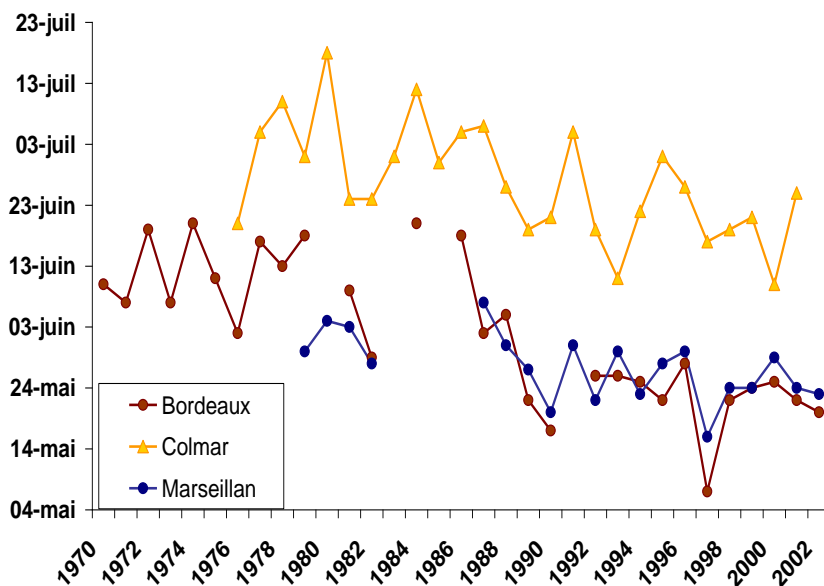


Figure 2 : Evolution de la date de floraison du Chasselas dans trois vignobles français : Bordeaux (Aquitaine), Colmar (Alsace), et Marseillan (Languedoc-Roussillon) (base de données Phénoclim)

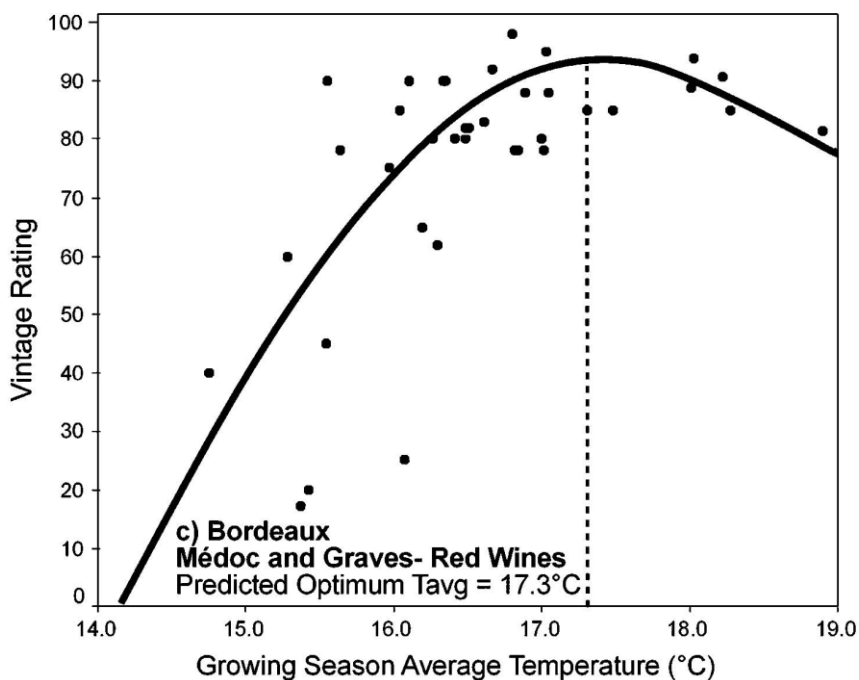


Figure 3 : Note des millésimes des Médoc et Graves en fonction de la température moyenne pendant la période de développement (Jones *et al.* 2005)

MISE EN PLACE D'UN PROTOCOLE DE TRAITEMENT DE DONNEES POUR L'ETUDE DE L'ADAPTATION D'UNE LARGE GAMME DE CEPAGES AUX EVOLUTIONS CLIMATIQUES EN BORDELAIS

INTRODUCTION : Contexte et enjeux

En Gironde, la viticulture occupe 120000 ha soit 50% de la surface agricole du département (Source : chambre d'agriculture). L'ensemble du vignoble girondin bénéficie de l'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC), et représente ainsi plus d'un quart de la surface du vignoble AOC français. Les vins de Bordeaux sont divisés en de nombreuses AOC régionales et communales dont les plus prestigieuses, Médoc, Graves, St Emilion, Pomerol, Côtes de Blaye... sont connues dans le monde entier.

La région du vignoble bordelais est un acteur important de l'économie locale et nationale puisque 6 millions d'hl y sont produits (Source : INAO 2010) et génèrent 3,4 milliards d'euros par an. Ses vins à haute valeur ajoutée sont fortement exportés (33% de la production) et participent à la valorisation économique et culturelle d'un terroir en France et à l'étranger.

La qualité d'un vin dépend d'un grand nombre de facteurs, et en premier lieu de la qualité du raisin et de la vendange. Le raisin doit être récolté à un stade optimal de maturité et dans un parfait état sanitaire. En général, des baies de petite taille, avec une pellicule épaisse (choix de la variété) augmentent la quantité de tannins et de polyphénols, tandis que l'équilibre sucre/acide (choix de la variété, et de la date de vendange) joue sur la structure du vin.

Toutefois, à l'image de l'année 2003, la profession viticole se trouve maintenant régulièrement confrontée à des incidents climatiques qui influent fortement sur la production et la qualité du vin. Aujourd'hui, les prévisions tablent sur un réchauffement global, ainsi qu'une augmentation de la fréquence des événements météorologiques exceptionnels.

Les effets du changement climatique apparaissent comme une problématique majeure pour la viticulture actuelle et future. Ces dernières années ont notamment montré en France un net avancement du cycle phénologique de la vigne (Figure 2). Ce décalage a pour conséquence une maturation du raisin à une période plus chaude qu'auparavant. La vendange est de fait précoce, et le raisin, s'il présente un taux de sucre élevé et une faible acidité, n'a généralement pas atteint les taux optimum en termes de polyphénols et autres composés métaboliques secondaires qui garantissent une bonne structure et un vin de garde. En effet, il existe une température optimale pour produire un vin de qualité (Figure 3).

Déjà, et dans les prochaines années il faudra s'adapter à tous les niveaux : des pratiques culturales aux méthodes de vinification. Si des ajustements viticoles et œnologiques sont possibles sans modifier radicalement la structure du vignoble (modification des techniques d'effeuillage et d'entretien du sol, modification de la date des vendanges...), ces derniers ne seront pas forcément suffisants.

Les professionnels du vin de Bordeaux, qui souhaitent conserver la spécificité de leur produit (« *élégance et finesse* ») sans déplacer le vignoble, ni créer de rupture qualitative et/ou économique, envisagent à plus long terme des solutions portant principalement sur le choix des variétés plantées et/ou des porte-greffe. C'est dans le projet global ambitieux et de longue durée intitulé **étude de la réponse d'une large gamme de cépages aux évolutions climatiques en Bordelais** que s'inscrit le travail présenté ici qui concerne plus spécifiquement la mise en place d'un protocole de traitement des données.

Après avoir présenté dans une première partie les recherches bibliographiques effectuées sur la vigne et les changements climatiques, nous présenterons le dispositif principal sur lequel porte cette étude, ainsi que les mesures qui y sont effectuées dans le but de caractériser les cépages implantés. Nous serons amenés à détailler tout d'abord les mesures de phénologie, puis les suivis de maturation des raisins produits. Dans une troisième partie, nous nous intéresserons à la calibration d'un analyseur IRTF indispensable à l'étude. Enfin nous terminerons par une ouverture sur des aspects sensoriels du vin.

1 = Développement des feuilles			
10		SORTIE DES FEUILLES Apparition des feuilles rudimentaires qui sont rassemblées en rosette, dont la base est encore protégée par la bourre progressivement rejetée hors des écailles.	D
11		DÉVELOPPEMENT DES FEUILLES Première feuille étalée et écartée de la pousse.	D - E
12		DÉVELOPPEMENT DES FEUILLES Deux feuilles étalées.	E
13		DÉVELOPPEMENT DES FEUILLES Trois feuilles étalées.	E
14		DÉVELOPPEMENT DES FEUILLES Quatre feuilles étalées, stade 51 possible.	E - F
5 = Apparition des inflorescences			
51		GRAPPES VISIBLES Inflorescences visibles, 4 à 6 feuilles étalées.	F
53		GRAPPES SÉPARÉES Les inflorescences s'agrandissent, les boutons floraux sont encore agglomérés.	G
55		BOUTONS FLORAUX SÉPARÉS Les boutons floraux de l'inflorescence sont séparés.	H

Figure 4 : Extrait des échelles d'Eichhorn et Lorentz (à gauche), et de Baggiolini (à droite) caractérisant les stades phénologiques de la vigne
http://www.agroscope.admin.ch/data/publikationen/ch_08_pub_RSVH_40_6_I-IV_f.pdf

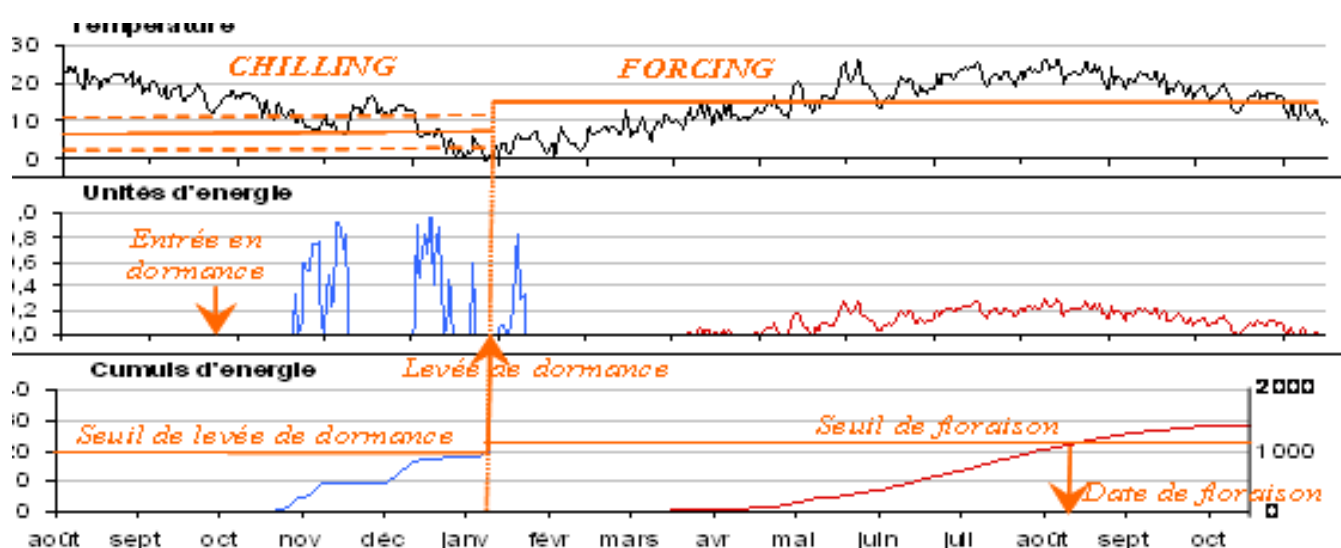


Figure 5 : Principe du modèle phénologique avec levée de dormance (Landais, 2007)
https://www.supagro.fr/pollen/index.php?option=com_content&task=view&id=59&Itemid=203

I. Bibliographie générale : phénologie de la vigne et changement climatique

A. Phénologie de la vigne

La Vigne cultivée (*Vitis vinifera* L.) est une plante pérenne qui présente des cycles végétatifs caractérisés par plusieurs stades se déroulant successivement au cours d'une année. L'étude de la survenue de ces stades de développement est appelée **phénologie**. On s'intéresse ainsi à la date d'ouverture des bourgeons à la sortie de l'hiver, aux premières fleurs, ou encore au début de la période de maturation (véraison) et à la maturation des fruits.

1. Les différents stades phénologiques de la vigne

Le développement de la plante est découpé en stades distincts, qui permettent de repérer et de dater les étapes clés (Figure 4). Il existe différentes échelles dont la plus couramment utilisée pour *Vitis vinifera* est probablement celle des stades de Baggiolini.

Nous retiendrons les principaux stades qui sont le débourrement (éclosion des bourgeons), la floraison (ouverture des capuchons floraux), et la véraison (changement de couleur et/ou de texture de la baie qui marque le début de la maturation). Comme ils ont une certaine durée, nous prenons généralement comme repère la date de mi- stade, où la moitié des organes concernés franchissent l'étape.

L'enregistrement de ces dates permet d'évaluer, au travers de modèles, l'effet du climat sur le développement du végétal.

2. Etat des lieux rapide des modèles de phénologie existants

Il existe de très nombreux modèles phénologiques qui sont presque tous basés sur des données climatiques (Richardson, 1974, Chuine *et al.*, 2003, Caffarra & Eccel, 2009, García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2009, Parker *et al.*, 2010,...). En effet il y a un lien très étroit entre les conditions météorologiques et le développement de la plante, en premier lieu la température de l'air car les réactions biochimiques sont hautement thermosensibles (Brisson *et al.*, 2010). « L'âge » d'un organe végétal est ainsi généralement exprimé en degré*jour (qui correspond à une somme de températures cumulées).

La plupart des modèles phénologiques rencontrés pour la vigne reposent sur des principes simples. Chaque passage d'un stade au stade suivant correspond à la satisfaction des besoins en chaleur, et dans certains cas en froid (Figure 5, Landais, 2007). C'est donc avec une somme de températures, plutôt qu'une date, que ces modèles fonctionnent. Ces besoins peuvent varier en fonction du cépage, du type de sol, etc... Comme tous les modèles biologiques ils sont très simplifiés et de nombreux paramètres n'entrent pas en compte (photopériode, rayonnement, précipitations...).

a) Modèles sur le débourrement

Le modèle général repose comme nous l'avons mentionné sur une somme de températures, avec ou sans levée de dormance (satisfaction des besoins en froid). Concrètement, nous déterminons une date initiale et une température de base (température au-dessus de laquelle les degrés sont cumulés) : en général 10 °C car la plupart des auteurs considèrent qu'il n'y a pas d'évolution en dessous de ce seuil de température. Le nombre de degrés jour cumulés jusqu'au débourrement est alors calculé (Garcia de Cortázar Atauri, 2009).

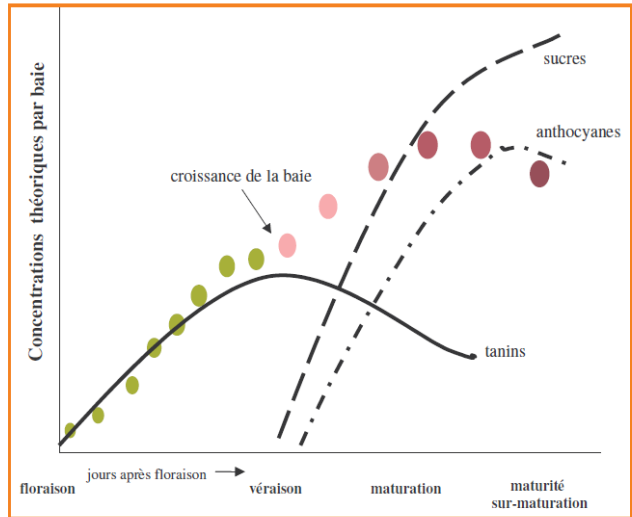
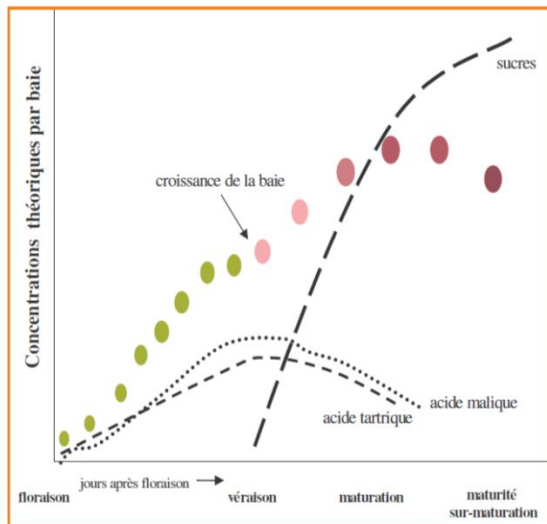


Figure 6 : Courbes théoriques montrant l'évolution de la concentration en sucres, acides organiques, anthocyanes et tanins dans la baie (Deloire, 2008)

(http://www.obs-viti-cq34.com/viti/fiche_doc.jsp?idaction=null&id_doc=1047&idtheme=011101)

Une levée de dormance peut être ajoutée à ce modèle, elle nécessite une satisfaction des besoins en froid qui déclenche le début de l'accumulation des degrés jours et mènera au débourrement. C'est le cas du modèle BRIN, publié par García de Cortázar Atauri *et al.* en 2009, qui comprend également un seuil maximal de degrés accumulés par jour.

b) Modèles sur floraison et véraison

Pour ces deux stades de développement, le modèle général repose aussi sur une somme de températures. Parker *et al.* (2010) ont comparé quatre modèles de ce type (Spring warming, UniFORC, UniCHILL, GFV) pour la floraison et la véraison en Europe. Les données historiques des dates de 50% floraison et véraison ont été collectées en France, Italie, Suisse et Grèce entre 1960 et 2003. Elles couvrent 123 zones géographiques et 81 cépages.

Exemple du modèle *Spring Warming SW* :

$$State(time: ts) = \sum_{t_0}^{ts} Rate(temperature) > F *$$

$$\text{avec } Rate(T) = \begin{cases} T - Tb & \text{si } T > Tb \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Il y a 3 paramètres à estimer : T_b , t_0 et F^* . t_0 peut être fixé au 1^{er} janvier, ou tout autre jour de l'année.

Il ressort que le modèle GFV (Grapewine Flowering Veraison) proposé, présente le meilleur rapport performance/complexité. Il est simple et repose sur une température de base de 0°C pratique à calculer. Les auteurs s'interrogent tout de même sur les phénomènes ayant lieu en dessous de 10°C, on peut soupçonner que la bonne qualité de prédiction en base 0°C trahit l'existence d'autres facteurs influents.

c) Modèles sur la maturation

La maturation du raisin est un processus complexe qui implique de nombreux mécanismes biochimiques de transport, de conversion de solutés (notamment carbonés) dans la baie. Le suivi des concentrations de différents composés dans la baie a permis d'établir des courbes de maturation (Figure 6).

Comme nous pouvons le voir, la composition des baies est modifiée au cours de la maturation. Les acides organiques sont dégradés et partiellement convertis en sucres, les polyphénols, mais aussi les minéraux et l'azote se concentrent. Mais ces phénomènes, bien que simultanés, ne sont pas nécessairement les conséquences d'une cause commune, et un découplage plus ou moins important peut apparaître. Un raisin mûr possède un rapport sucres/acidité élevé, et pour les variétés noires destinées à faire du vin rouge, une pellicule riche en anthocyanes et en tanins peu astringents et peu de tanins astringents dans les pépins. Nous pouvons toutefois distinguer de nombreuses maturités : la maturité physiologique, phénologique, technologique, aromatique, phénolique, et enfin la maturité œnologique, décidée par le vinificateur qui tient compte de l'ensemble des maturités évoquées. (Fiches pratiques IFV Sud-Ouest)

Compte tenu de la grande complexité des phénomènes en jeu, il est très difficile d'établir un modèle prenant en compte tous les paramètres (souvent non modifiables au champ), et la compréhension des mécanismes de la maturation reste très partielle.

En résumé, peu de modèles sont disponibles. Il existe toutefois des modèles pour l'accumulation des sucres, qui sont descriptifs mais non explicatifs. Nous les développerons dans la partie III. D.

3. Intérêt des modèles phénologiques dans un contexte de changement climatique

S'il est important pour le professionnel de pouvoir prédire sur son exploitation les stades clés comme la maturité des raisins, les modèles phénologiques permettent surtout d'évaluer l'impact des changements climatiques. Ce sont eux qui permettent de simuler la réponse du matériel végétal aux différents scénarios envisagés (projet PERPHECLIM). Les prévisions socio-éco-démographiques ont donc besoin de ce type de modèle pour évaluer les conséquences d'un climat changeant sur l'agriculture. (Exemple du modèle BHV p 65 Brisson *et al.*, 2010).

B. Changement climatique, scénarios globaux et locaux

La réalité du changement climatique est maintenant communément admise et on cherche des moyens de s'y adapter, voire d'en tirer parti plus que de l'éviter. Il est donc essentiel de prévoir l'évolution du climat et il existe divers scénarios climatiques régionalisés (Arpège), développés par des organismes comme Météo France, dépendant notamment des actions de la population humaine dans différents domaines (économie, démographie, environnement...).

Les prévisions du scénario B2 du GIEC (accroissement modéré du CO₂ atmosphérique) pour l'Europe sont à l'horizon 2070 une hausse générale des températures d'au moins 2,5°C (Figure 7), une augmentation des précipitations hivernales, une diminution des pluies estivales (sécheresse), davantage d'incidents météorologiques... Un climat moins régulier et une véritable préoccupation autour de la disponibilité de l'eau se profilent donc (Rapport GIEC 2007).

Dans ce cadre général, nous allons nous intéresser plus spécifiquement aux prévisions concernant les végétaux et en particulier la vigne.

1. Effets sur la vigne, le vin

La conséquence principale de l'augmentation des températures sur les végétaux est un avancement du cycle phénologique (Menzel *et al.*, 2006). En effet, c'est le caractère le plus sensible à la température, et en particulier pour les plantes pérennes telles que la vigne qui ont une vitesse d'adaptation bien moindre que les plantes annuelles (mention dans l'appel à projets région Aquitaine et le Meta programme PERPHECLIM).

L'effet du réchauffement sur la phénologie de la vigne est d'autant plus fort que cette plante est très peu sensible à la photopériode (Keller, 2010). Toutefois, dans un contexte où l'eau devient une ressource de plus en plus précieuse, la vigne, qui présente des besoins en eau limités, semble moins menacée que d'autres cultures. Une contrainte hydrique modérée est même favorable à la qualité du fruit (Brisson *et al.*, 2010), mais une contrainte trop sévère peut mener à une perte de la récolte par blocage de la maturation (Van Leeuwen *et al.*, 2009).

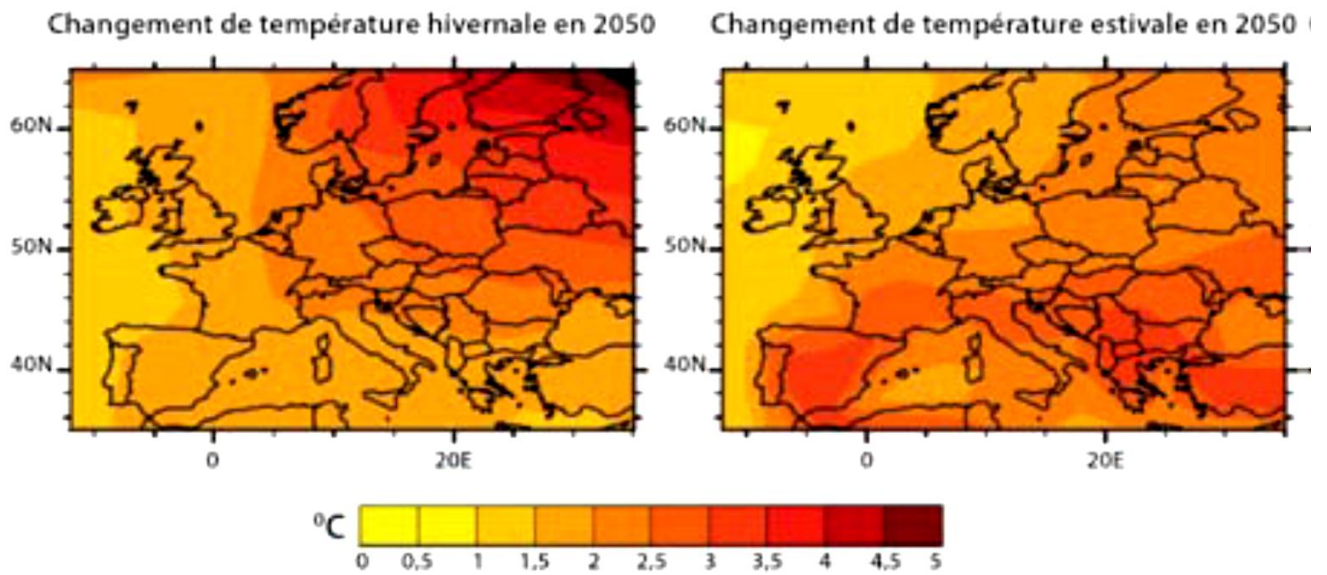


Figure 7 : Anomalies de température en Europe pour le climat de 2050 telles que simulées par le multi modèle du GIEC (source : Livre Vert du Projet Climator)

Enfin, des conditions chaudes et sèches pendant la maturation affectent la photosynthèse et le métabolisme des polyphénols et précurseurs d'arômes, composants essentiels de la qualité de la baie de raisin (Brisson *et al.*, 2010).

Ces dernières années, de nombreuses publications mettent en évidence les effets du changement climatique dans plusieurs régions viticoles (Jones *et al.*, 2005, Bellia *et al.*, 2007, Webb *et al.*, 2008, ...). Il en ressort que le climat va nécessairement influencer le style de vin produit. Par exemple, un été chaud et sec est favorable à la production de vins rouges de garde (raisins riches en polyphénols et peu acides), mais rend la production de vins blancs ou rosés plus délicate (Van Leeuwen *et al.*, 2009).

2. En Bordelais...

Les simulations du modèle STICS (García de Cortázar-Atauri, 2006) prévoient une avancée de la date moyenne de récolte de la vigne à Bordeaux d'environ 13 jours dans un futur proche, et de plus de 25 jours dans un futur lointain (Brisson *et al.*, 2010).

Comme nous l'avons détaillé précédemment, ce décalage aura des conséquences sur la qualité du raisin et donc du vin (notamment un découplage entre maturité technologique et maturité phénolique).

Devant de telles prévisions, il devient évident que si la viticulture souhaite se maintenir dans le Bordelais, elle doit s'adapter. Il existe un grand nombre de leviers d'action : les pratiques culturales, qui actuellement œuvrent plutôt pour « chauffer » la plante et la baie (forte densité de plantation, effeuillage, exposition des parcelles...) peuvent être modifiées dans un premier temps. Sur le long terme, il est probable que cela ne soit pas suffisant. En dehors d'un déplacement du vignoble, les choix de porte-greffe, clones et/ou de cépages à phénologie tardive permettrait de compenser plus fortement l'avancement de la phénologie. (Brisson *et al.*, 2010)

Sur une culture comme la vigne, pour laquelle l'entrée en production effective d'une parcelle prend près de quatre ans, il est souhaitable de disposer de bases de connaissances solides sur lesquelles appuyer ses choix. C'est avec cet objectif que le dispositif sur lequel nous avons travaillé a été mis en place.

II. Essai phénotypage

A. Présentation de l'expérimentation – problématique précise

Dans l'éventualité d'une modification de l'encépagement dans le Bordelais, il est nécessaire d'avoir des informations sur le comportement d'un maximum de variétés potentiellement cultivables dans le contexte pédoclimatique visé. Dans cette optique, une parcelle expérimentale regroupant une cinquantaine de cépages avec répétition a été mise en place par l'INRA, afin d'en étudier précisément le comportement phénologique et l'adaptation.

Les 52 cépages retenus pour cette expérimentation ont été sélectionnés sur les critères d'intérêt suivants :

- leur notoriété et importance mondiale en superficie de plantation
- leur degré de précocité (une forte proportion de cépages relativement tardifs a été choisie)
- leur potentiel qualitatif (équilibre, arômes, structure) dans leur zone de production
- une typicité assez proche des produits issus des cépages bordelais est recherchée

Ainsi, 32 cépages noirs (notés N), 20 cépages blancs (notés B) dont 5 hybrides résistants de provenances variées (Annexe 1) sont étudiés sur le dispositif.

La parcelle expérimentale a été plantée en juin 2009 sur le domaine de la Grande Ferrade à Villenave d'Ornon. Celle-ci s'étend sur 62 ares, qui correspondent à 42 rangs de 13 piquetées avec un espacement de 1.8x1m entre les pieds. (Figure 8). La caractérisation pédologique de la parcelle a permis d'établir que l'on se trouve sur un sol graveleux, représentatif de cette région de Bordeaux (appellation Graves).

Chaque cépage est représenté par 50 pieds répartis en 5 placettes de 10 individus (2 piquetées de 5 pieds se faisant face sur deux rangs) sur 5 blocs. Les placettes ont été réparties aléatoirement au sein de chaque bloc. (Figure 8)

La parcelle est destinée à être suivie chaque année pendant une longue période. Etant donné l'ampleur et l'intérêt du dispositif, les mesures réalisées sont multiples. Elles concernent aussi bien la phénologie de la vigne (date de mi-débourrement, mi-floraison, mi-véraison), que le suivi de maturation du raisin (cinétiques d'accumulation). La parcelle entre tout juste en production (plantation en 2009) mais des micro-vinifications sont prévues d'ici deux ou trois ans afin de caractériser les qualités œnologiques des cépages plantés.

Dans le but de faciliter le recueil et le traitement des données de terrain, un système de terminaux à code-barres a été mis en place pour le suivi de la parcelle. La saisie est grandement simplifiée puisqu'elle s'effectue directement dans les rangs, sans report de référence fastidieux. Les erreurs sont ainsi limitées.

Un des objectifs majeur du stage était de mettre en place un système simplifié et automatisé de traitement de toutes les données générées par ce dispositif. Ce travail a concerné aussi bien les données de phénologie (partie B) que l'étude de maturation des cépages (partie C).



Figure 9 : Grappe de vigne en cours de floraison - la Grande Ferrade, Mai 2012, Durand

classement des cépages par somme de température (base 0°C - DOY 0) de mi-floraison 2012

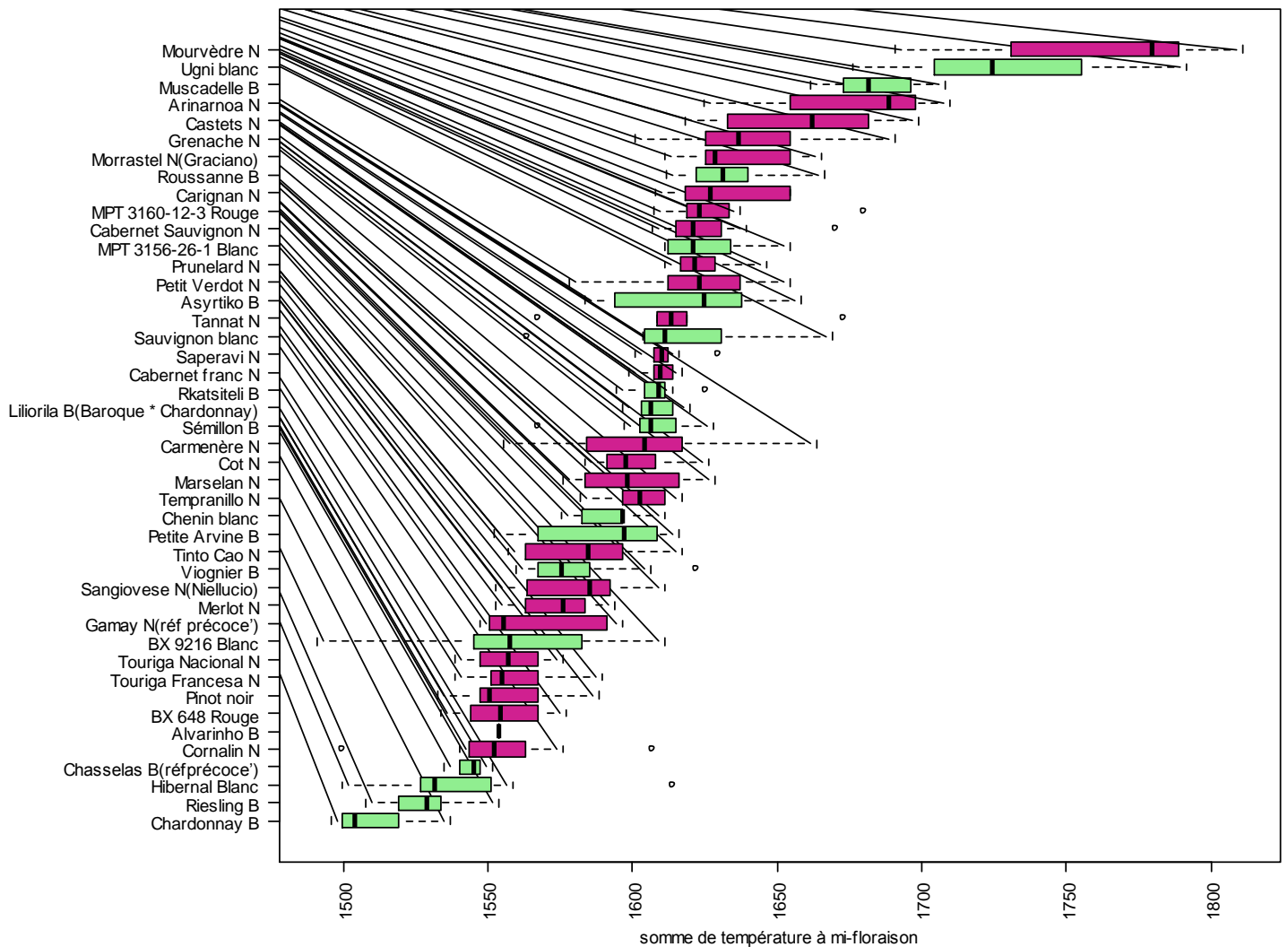


Figure 10 : Classement des cépages par somme de températures (base 0°C jour 0) de mi-floraison moyenne 2012 (~10 individus statistiques par cépage)

B. Données de phénologie : débourrement, floraison et véraison

Afin de permettre une prise en charge des données de phénologie en routine, des scripts (langage R) ont été développés en mettant l'accent sur la simplicité d'utilisation, l'automatisation, ainsi que la pertinence des sorties (graphiques notamment). Un document « pédagogique » aidant à prendre en main les scripts et les données a été rédigé pour accompagner l'utilisateur (Annexe 7), qui ne peut toutefois pas être complètement novice dans l'utilisation de R.

Typiquement, une fois les relevés effectués sur le terrain, les données sont déchargées et les scripts permettent de récupérer des fichiers globaux à jour ainsi qu'une nouvelle base pour le relevé suivant (les individus étant supprimés de la base une fois le stade souhaité atteint)

La prise en charge des données aboutit à l'obtention pour chaque individu d'une date en jour julien (éventuellement en somme de températures : données station météo Grande Ferrade) où le stade souhaité est atteint (mi-débourrement, mi-floraison, mi-véraison, maturité). Le dispositif étant encore récent, ces données ne sont disponibles que depuis 2012 (2011 pour floraison et véraison).

1. Tableaux de données et sorties graphiques par année

L'individu statistique étudié est ici une piquetée (soit 5 pieds sur un rang). Les 5 pieds sont considérés ensemble et chaque mesure enregistrée est une moyenne des relevés sur ces derniers. L'identification des individus par un code barre à 13 chiffres informatif permet d'extraire aisément les informations utiles pour l'analyse (cépage, bloc, rang ...)

Exemple de suivi d'un stade : Floraison (Figure 9)

La parcelle est visitée régulièrement dès qu'un stade phénologique démarre. Par exemple pour le stade floraison (Cf. : tableau 1) les relevés ont eu lieu 5 fois entre le jour 123 (2 mai) et 136 (15 mai). A chaque passage, le pourcentage de floraison sur tous les individus de la base est observé et enregistré dans le terminal, puis ajouté au tableau de données. En général deux à trois mesures par semaine sont effectuées, jusqu'à ce que tous les individus aient atteint 50%.

Identifiant (Code Barre)	parcelle	rang	piquetée	cépage	bloc	couleur	placette	X123	X126	X130	X133	x136
0010110210010	0	1	1	Carmenère N	2	1	1	0	1	40	100	NA
0020110210010	0	2	1	Carmenère N	2	1	1	0	4	65	NA	NA
0010408210040	0	1	4	Cabernet Sauvignon N	2	1	4	0	0	2	40	100

Tableau 1 : Extrait du tableau de données Floraison 2011

Ces mesures permettent d'obtenir une **date de mi-floraison** (ou autre stade) pour chaque individu (piquetée), en considérant une évolution linéaire entre deux dates de relevé. Par exemple pour le premier individu du tableau (indication orange), nous avons :

$$J_{50} = \frac{50-b}{a} \text{ avec } b = N_2 - J_2 * \frac{N_2-N_1}{J_2-J_1} \text{ et } a = \frac{N_1-b}{J_1}$$

$$N_1=40, N_2=100, J_1=130, J_2=133 \rightarrow b=-2560 \text{ } a=20 \text{ et } J_{50}= 130.5$$

Cette nouvelle variable permet d'obtenir 10 dates (10 piquetées par cépage - 2x5 blocs) pour un stade donné pour chaque cépage, de les classer, et de caractériser ainsi le degré de précocité du cépage considéré (Figure 10).

Tableau 2 : Comparaisons multiples des sommes de température de mi-floraison par cépage (correction de Bonferroni $\alpha=5 \times 10^{-5}$) : deux cépages ne sont pas significativement différents s'ils ont une lettre en commun

LSD : 42.38°j

Cépage	Moyenne	Groupes Bonferroni
Mourvèdre N	1450.3	a
Ugniblan	1417.7	a
MuscadelleB	1372.0	b
ArinarnoaN	1363.1	bc
CastetsN	1344.5	bcd
GrenacheN	1326.9	cde
MorrastelN(Graciano)	1323.8	cde
RoussanneB	1322.6	cdef
CarignanN	1319.2	defg
MPT460544Rouge	1317.7	defg
CabernetSauvignonN	1314.1	defg
MPT3156-26-1Blanc	1314.1	defg
PrunelardN	1312.0	defgh
PetitVerdotN	1310.9	defghi
AsyrtikoB	1307.1	defghij
TannatN	1303.5	defghijk
Sauvignonblanc	1302.5	defghijk
SaperaviN	1299.2	efghijk
CabernetfrancN	1297.7	efghijk
RkatsiteliB	1296.3	efghijk
LiliorilaB(BaroqueChardonnay)	1295.8	efghijkl
SémillonB	1293.5	efghijkl
CarmenèreN	1291.7	efghijkl
CotN	1289.3	efghijklm
MarselanN	1288.6	efghijklmn
TempranilloN	1288.5	efghijklmno
Cheninblanc	1280.5	fghijklmnop
PetiteArvine	1279.4	ghijklmnop
TintoCaoB	1271.3	hijklmnopq
ViognierBN	1269.2	ijklmnopqr
SangioveseN(Niellucio)	1267.2	jklmnopqr
MerlotN	1261.9	klmnopqr
GamayN(réfprécoce')	1253.9	lmnopqrs
BX9216Blanc	1247.3	mnopqrs
TourigaNacionalN	1246.4	nopqrs
TourigaFrancesaN	1246.2	opqrs
Pinotnoir	1244.0	pqrs
BX648Rouge	1242.5	pqrs
CornalinN	1241.6	pqrs
ChasselasB(réfprécoce')	1232.0	qrst
HibernalBlanc	1227.7	rst
RieslingB	1217.3	st
ChardonnayB	1197.7	t

2. Analyse de variance

Une analyse de variance à un facteur permet ensuite de valider les différences observées entre les cépages. En effet nous souhaitons expliquer une variable quantitative (la date/somme de températures de mi-floraison), par un/des facteur/s (le cépage, et éventuellement le bloc, ici retiré du modèle car non significatif au seuil de 5%)

$$T_i = \mu + \text{cepage}_i + \varepsilon_i$$

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cepage	43	1016051	23629.1	54.118	< 2.2e-16 ***
Residuals	379	165479	436.6		

On note que l'hypothèse d'homogénéité des variances n'est pas respectée (test de Levene : $P = 0.0028$), et le test non paramétrique de Kruskal-Wallis conclut au même effet cépage significatif ($P < 2.2e-16$).

Le résultat de l'analyse de variance ou du test H de Kruskal-Wallis n'est toutefois pas suffisant dans notre cas puisqu'au-delà d'un effet global du facteur cépage significatif, on ne souhaite pas comparer les cépages par rapport à une référence, mais les uns par rapport aux autres. L'ANOVA ne renseigne pas sur les paires de groupes pour lesquelles la différence est significative. Pour cela on utilise un test de comparaison multiple dit *Post-Hoc*.

Comme un grand nombre de modalités est étudié ($r=43$), il y a de nombreuses paires à comparer ($43 \cdot 42 / 2 = 903$), ce qui multiplie les chances de juger identiques des paires différentes (test peu puissant). Pour remédier à cela, la correction de Bonferroni est appliquée, qui modifie le risque α dans les comparaisons de moyennes.

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{r(r-1)/2}$$

Concrètement, si l'écart observé entre les moyennes de deux groupes (cépage) a et b est supérieur au seuil $t_{dfR}(1 - \frac{\alpha_0}{2}) CM_R \sqrt{\frac{1}{n_a} + \frac{1}{n_b}}$, en supposant que les échantillons suivent une loi normale, les deux moyennes sont considérées différentes. (H_0 : « Les deux échantillons ont la même moyenne » est rejetée)

Le résultat se lit à l'aide des groupes : deux cépages ne sont pas significativement différents s'ils ont une lettre en commun (Tableau 2). Par exemple, Mourvèdre N et Ugni Blanc font partie d'un même groupe a, leur somme de températures de mi-floraison n'est donc pas différente, mais elle est significativement différente de celle de tous les autres cépages. Vingt groupes sont ainsi formés, et la plus petite différence significative entre deux moyennes est de 42.4 degrés jours.

De cette manière nous avons pu déterminer la date de mi stade et établir un classement des cépages pour l'ensemble des stades phénologiques étudiés. L'atteinte du stade mi-véraison marque le début de la période de maturation, à laquelle nous allons maintenant nous intéresser.

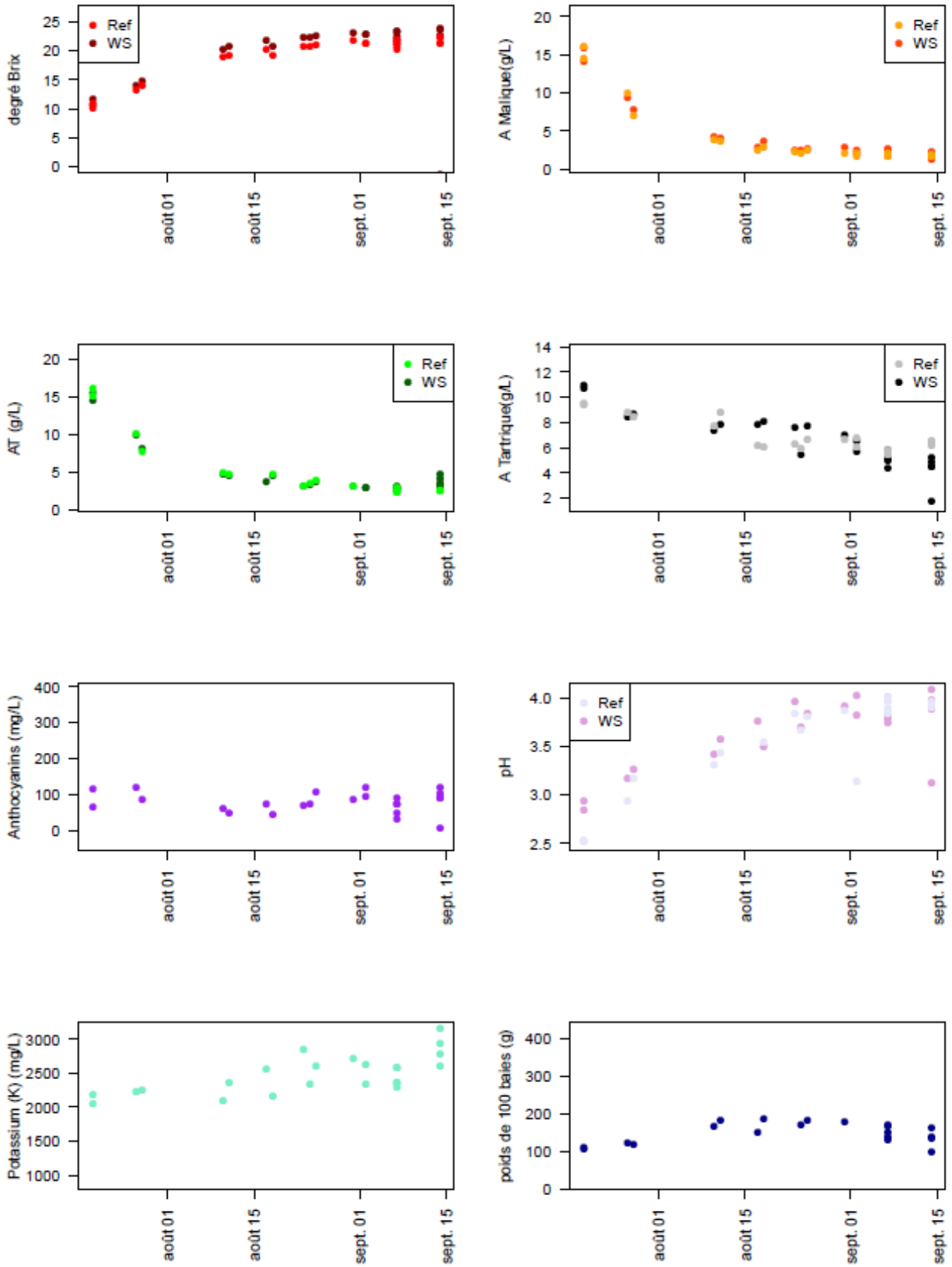


Figure 11 : Evolution de 8 variables mesurées au cours de la maturation 2011 pour le cépage Carmenère N. (Ref : mesure de référence ; WS : WineScan)

C. Etude de la maturation

Comme nous l'avons évoqué dans la partie bibliographie, la maturation des raisins est un processus qui revêt de nombreux aspects. La figure 11 montre l'évolution de plusieurs paramètres mesurés par des dosages et/ou à l'aide d'un analyseur IRTF sur les moûts de raisins prélevés tout au long de la saison 2011 (de la mi-véraison à la surmaturité) – Cas du cépage Carmenère N.

Les « symptômes » visibles à l'œil nu comme le grossissement de la baie, ou les changements de couleur de la pellicule sont accompagnés par d'importants phénomènes métaboliques tels que la dégradation des acides organiques (acide malique et acide tartrique), ainsi que des phénomènes de transport et de modification de concentration par le changement de volume de la baie. En résumé, des baies petites, vertes et acides se transforment en quelques semaines en fruit de plus grande taille, riches en sucres et en composés métaboliques secondaires (phénols, arômes), ainsi qu'en éléments minéraux (en particulier le potassium K) et en acides aminés (composés azotés non présentés ici).

Etant donné il s'agit du critère de maturité le plus évident, et le plus étudié, nous nous sommes plus particulièrement intéressés au taux de sucres dans les baies. Les paragraphes qui suivent présentent l'étude et les résultats obtenus pour ce paramètre « sucre ».

1. Caractérisation des courbes de maturation en sucres à l'aide d'un modèle non-linéaire sur un jeu de données complémentaire

L'essai phénotypage, dispositif de l'étude présentée dans ce rapport, n'a généré à ce jour des données que sur une année (2011). Bien que nous ayons des courbes de maturation à caractériser dans ce cadre, il serait imprudent de sélectionner un modèle général en n'utilisant que les données d'un millésime. Toutefois, l'UMR EGFV dispose en parallèle d'un jeu de données issu des suivis réalisés sur différentes parcelles d'une propriété viticole, au cours des 15 dernières années. Ce jeu de données a été mis à notre disposition pour initier cette étude.

a) *Présentation des données supplémentaires utilisées*

Un tableau a pu être formé à partir de ces nombreuses données. Il regroupe tous les suivis de maturation sur une quinzaine de paramètres, de la mi-véraison à la surmaturité, pour 2 à 3 cépages (Merlot, Cabernet-Sauvignon et Cabernet franc), et 3 types de sol (Graves, Argile, Sables).

Ces données permettent une appréciation de l'évolution de paramètres similaires à ceux mesurés dans l'essai phénotypage, sur plusieurs millésimes et pour des variétés bien implantées. Nous allons donc les utiliser comme un « entraînement » pour les futures données de la parcelle. Intéressons-nous comme annoncé en priorité à un paramètre simple mais néanmoins essentiel : la concentration en sucre dans la baie.

Sucres (g/L) dans les moûts issus des parcelles Cheval Blanc sur 3 types de sol entre 1996 et 2010

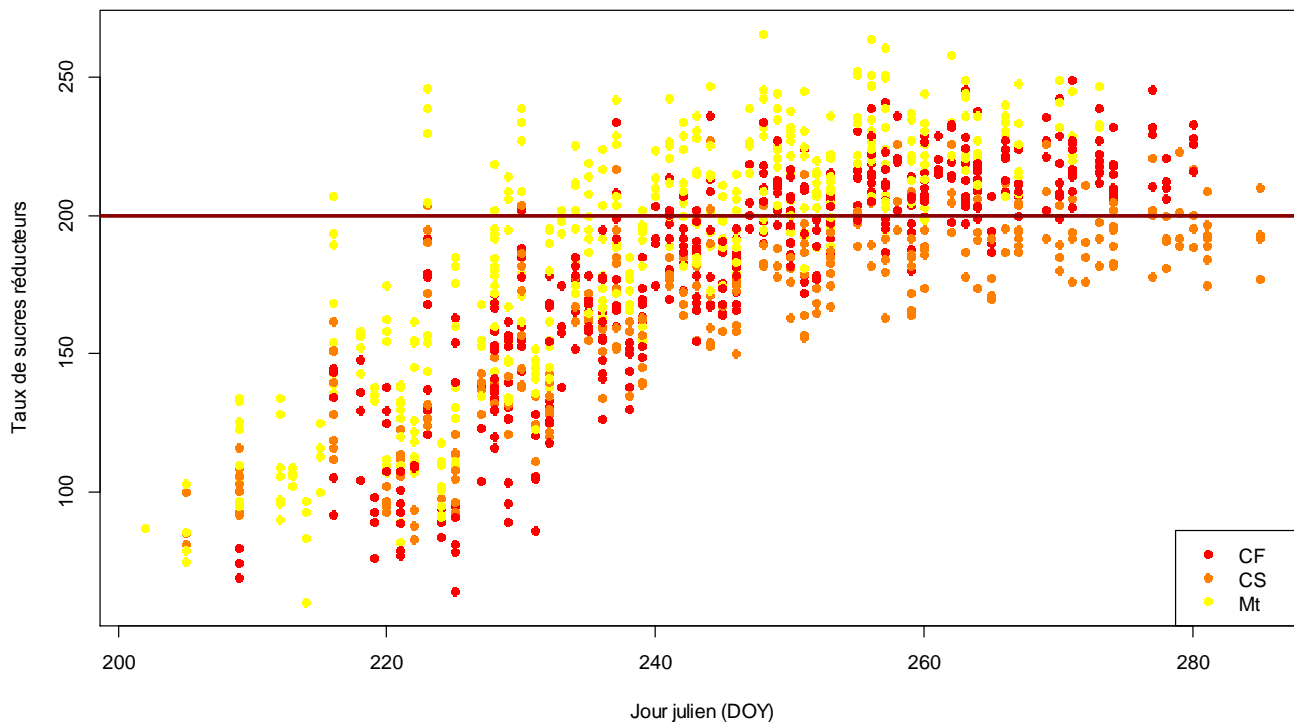


Figure 12 : Représentation de la dynamique du taux de sucres réducteurs dans les baies de trois cépages (CF : Cabernet franc, CS : Cabernet-Sauvignon, Mt : Merlot) sur 15 ans dans une propriété viticole du Bordelais

b) Ajustements de modèles pour l'accumulation des sucres

Les suivis de maturation donnent l'opportunité d'ajuster des modèles décrivant l'évolution des baies depuis la mi-véraison et jusqu'à la récolte. Ces éléments vont nous permettre de sélectionner un modèle que nous pourrions ajuster aux données de l'essai phénotypage, pour estimer des paramètres permettant de caractériser les cépages.

(1) Description des modèles envisagés

La figure 12 montre le taux de sucres réducteurs en fonction du jour julien (coloré par cépage) sur les quinze années. Le taux de sucre montre clairement une courbe à plateau. Au vu de l'allure de ces courbes de maturation, il semble à propos d'ajuster une équation non linéaire aux données.

Le modèle avancé par Sadras et al. en 2008, propose d'ajuster une courbe sigmoïde de formule :

$$S = \frac{S_{max}}{1 + e^{-\frac{x-x_0}{b}}}$$

Avec :

S la concentration en solides solubles

x le temps,

S_{max} la teneur maximale en solides solubles,

x_0 le temps auquel $S=S_{max}/2$, et

b l'intervalle entre $S=1/4*S_{max}$ et $S= 3/4*S_{max}$ divisé par une constante (2.197)

Il est difficile de trouver dans la bibliographie d'autres modèles utilisés pour décrire la courbe de maturation. Nous suggérons toutefois une autre équation non linéaire pouvant potentiellement bien s'ajuster aux données. C'est une courbe d'accroissement hyperbolique de formule :

$$S = S_{max} * (1 - e^{-(x-x_0)/a})$$

Avec :

S la concentration en solides solubles

x le temps

S_{max} la teneur maximale en solides solubles,

x_0 le temps auquel $S=0$ (début d'accumulation)

a $S_{max}/$ pente à l'origine

Dans les deux cas, les paramètres estimés sont interprétables biologiquement et décrivent la dynamique de maturation de façon précise. Ces deux modèles semblent être de bons candidats *a priori*.

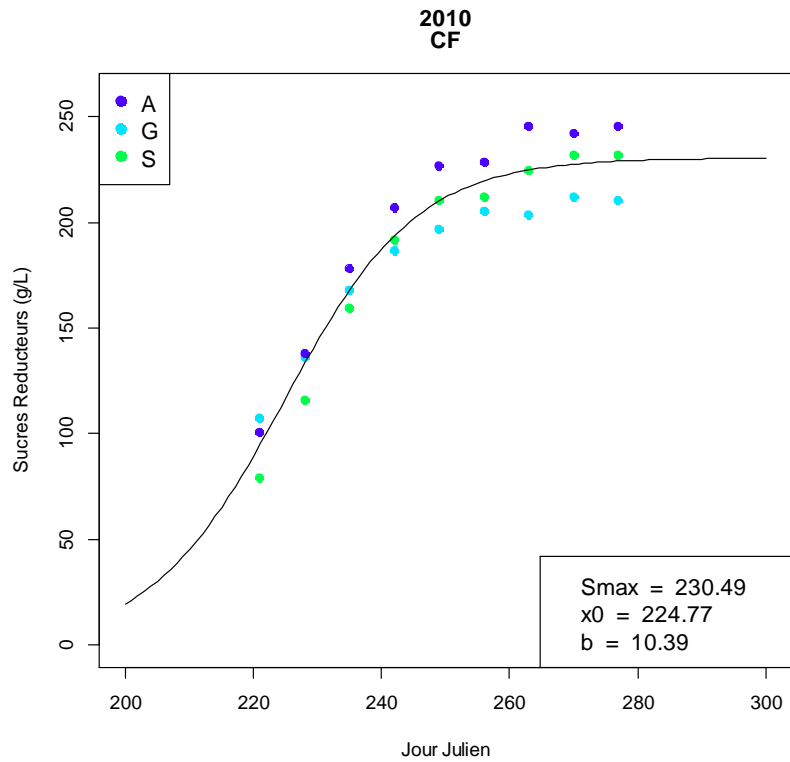


Figure 13 : Exemple d'un ajustement du modèle SADRAS (Cabernet franc en 2010 sur 3 sols : Argile (A), Graves (G), et Sable (S))

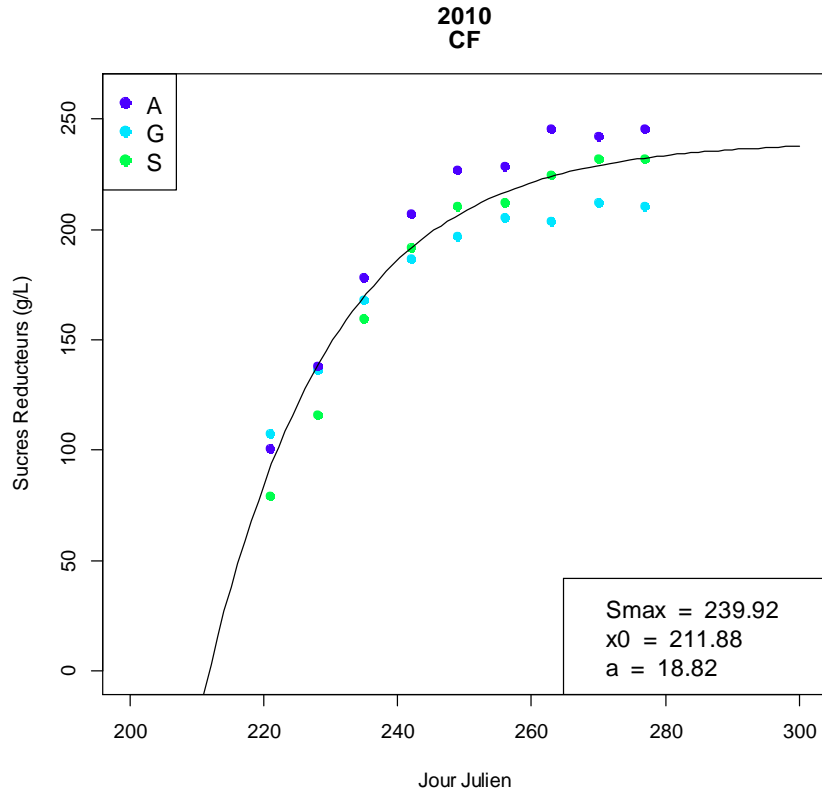


Figure 14 : Exemple d'un ajustement du modèle hyperbole (Cabernet franc en 2010 sur 3 sols : Argile (A), Graves (G), et Sable (S))

(2) Performances et choix d'un modèle

Dans un premier temps nous avons cherché à valider une équation sur les données issues de la propriété viticole. En effet, ces dernières étalées sur 15 ans, sont fiables, et donc plus « robustes » pour décrire un mécanisme général. Il convient de préciser ici que les paramètres sont estimés dans un but descriptif, et absolument pas prédictif. Un modèle par cépage et par an est ajusté sur les 3 types de sol, toutefois sur ces données, nous remarquons un net décalage (translation verticale) de tous les points en fonction du type de sol : Le sol graveleux (G) montre un écart relativement constant - quelle que soit la date - au sol argileux (A) (cf. figures 13 et 14).

Nous pourrions donc également ajuster un modèle par combinaison [cépage x sol x année], avec un seul point par date. L'objectif étant ici de sélectionner un modèle plutôt qu'un autre et non de caractériser les cépages et/ou les sols, nous nous en tenons à un modèle par [cépage x année].

(a) Qualité d'ajustement

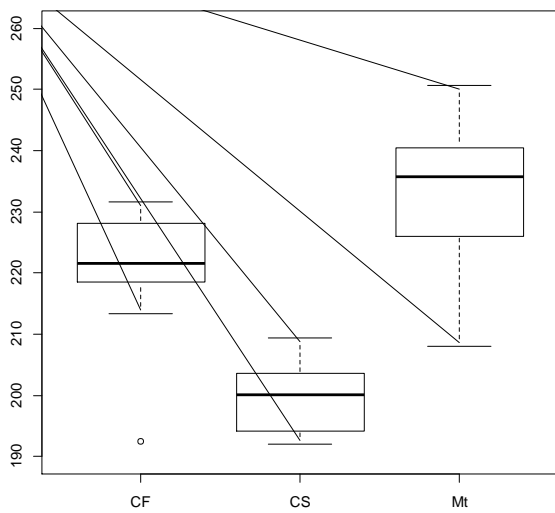
Le premier critère pour juger de l'adéquation entre un modèle et des données est la qualité de l'ajustement. Nous avons sélectionné deux indices de qualité d'ajustement :

- **RMSE** : Root Mean Squared Error, c'est la racine de la moyenne des écarts modèle-observations au carré. Il représente l'erreur « typique » faite par le modèle.
- **SSR** : Sum of Squared Residuals, c'est la somme des résidus au carré. C'est ce critère qui est minimisé dans l'algorithme d'ajustement (Gauss-Newton)

		SADRAS	HYPERB
RMSE	somme	363.3	364.5
	moyenne	9.6	9.6
	sd	1.9	1.9
SSR	somme	114695.7	115060.1
	moyenne	3018.3	3027.9
	sd	1187.5	1144.2

L'ajustement de l'hyperbole est à peine moins bon en terme de sommes des RMSE et SSR (i.e. somme sur l'ensemble des [années x cépages] ajustés), autant dire que les deux modèles s'ajustent aussi bien l'un que l'autre aux données. Il nous fallait donc utiliser d'autres arguments pour choisir un modèle.

Valeur du Smax ajusté par le modèle Sadras en fonction du cépage



Valeur du Smax ajusté par le modèle hyperbole en fonction du cépage

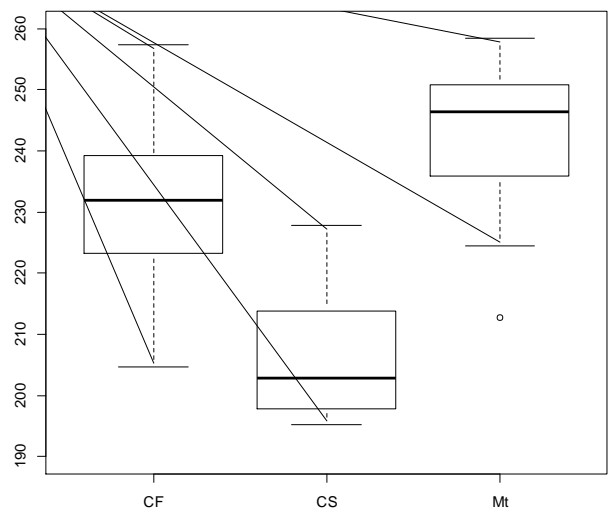


Figure 15 : Boxplots des paramètres Smax ajustés par les modèles Sadras (à gauche) et hyperbole (à droite)

(b) Valeur et interprétabilité des paramètres estimés

Si nous nous intéressons dans un premier temps à la « justesse » (empirique) des paramètres ajustés, nous observons que les deux modèles conduisent à des conclusions équivalentes. Par exemple, les taux de sucres atteints par les trois cépages étudiés correspondent assez bien au S_{max} déterminé par les modèles. Le Merlot (Mt) présente généralement une concentration en sucres à maturité supérieure aux deux Cabernets (CF et CS) (Figure 17).

Nous observons toutefois une plus grande dispersion et une légère supériorité des valeurs obtenues avec l'hyperbole, celle-ci a plus facilement tendance à ne pas dessiner de coude lorsque le plateau n'est pas atteint, ce qui augmente la valeur de S_{max} (Figure 17).

Les paramètres estimés dans le modèle SADRAS sont très simples à interpréter, x_0 donne une estimation de la date de mi-maturité, tandis que $1/b$ traduit la vitesse maximale de maturation. Les paramètres du modèle hyperbole sont un peu plus délicats. Si on retrouve S_{max} qui donne la concentration en sucres du plateau, x_0 est une date non observable où la concentration en sucre est nulle, et a la pente à ce moment. Ces paramètres ne sont pas une indication véritablement pertinente dans cet état. Il est envisageable de reparamétriser ce modèle, en ajoutant une constante de type S_0 , le taux de sucre à mi véraison, mais au prix de l'ajout d'un paramètre.

De plus, un type de courbe sigmoïde où la vitesse d'accumulation du sucre augmente progressivement est plus réaliste qu'une courbe où la vitesse maximale correspond à la vitesse initiale. Le modèle Sadras semble donc plus juste biologiquement parlant que l'hyperbole.

(c) Critères computationnel et pratique

Les problèmes de convergence éventuellement rencontrés résultaient d'un manque de données pour certaines modalités. Il n'y a rien à signaler quant aux temps de calcul ou autres difficultés avec l'un ou l'autre des modèles.

Même si le problème ne s'est pas présenté, il est plus facile de déterminer empiriquement des valeurs initiales correctes pour le modèle SADRAS, car ces dernières appartiennent supposément à l'intervalle étudié. x_0 correspond à t_0 dans le modèle HYPERBOLE, valeur qui n'est jamais donnée, tandis qu'il correspond à $t_{1/2}$ dans SADRAS, plus proche des premiers temps de mesure.

(3) Bilan

Le modèle sigmoïde (SADRAS) retenu s'ajuste bien aux données d'accumulation en sucre. Il permet de caractériser facilement et avec des paramètres intuitifs les courbes de maturation. Nous pouvons donc en tirer pour un cépage donné par exemple, le taux de sucre maximal (S_{max}), ou encore la date de mi- maturité. C'est ce modèle que nous allons mettre en œuvre alors pour caractériser la maturation des cépages de l'essai phénotypage.

2. Application à l'essai phénotypage

Nous allons maintenant nous intéresser aux données de maturation issues de la parcelle phénotypage. Pour commencer nous décrivons le protocole appliqué pour le suivi, puis nous mettrons en œuvre l'ajustement du modèle de cinétique d'accumulation des sucres retenu, et enfin nous utiliserons une méthode exploratoire pour caractériser les cépages par la composition des moûts à surmaturité.

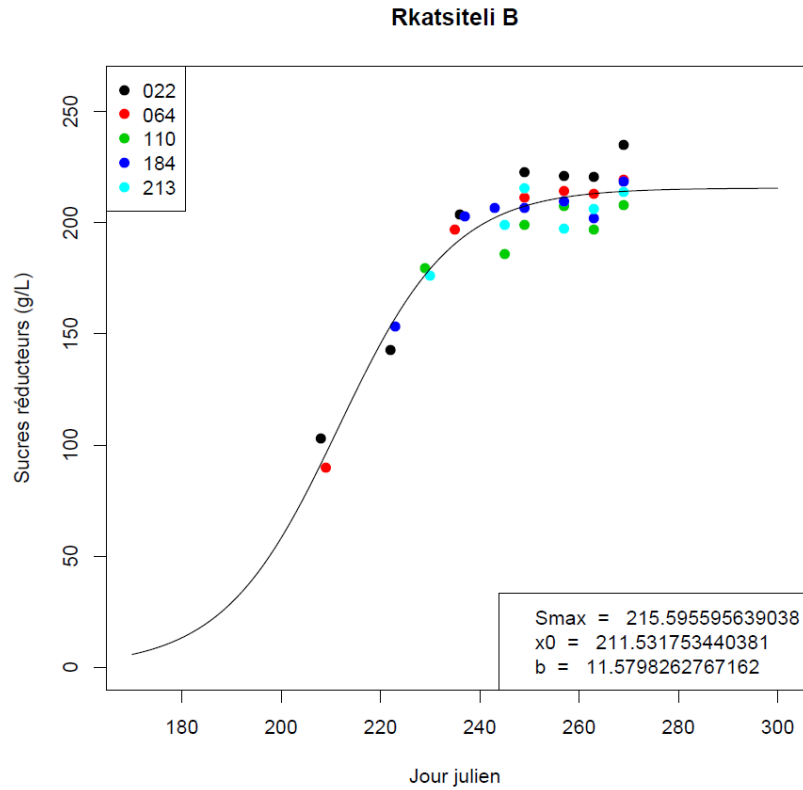


Figure 16 : Ajustement du modèle SADRAS aux données de concentration en sucres réducteurs (g/L) (WineScan) obtenues sur le cépage Rkatsiteli B au cours de la campagne 2011 de l'essai phénotypage (5 réplicats)

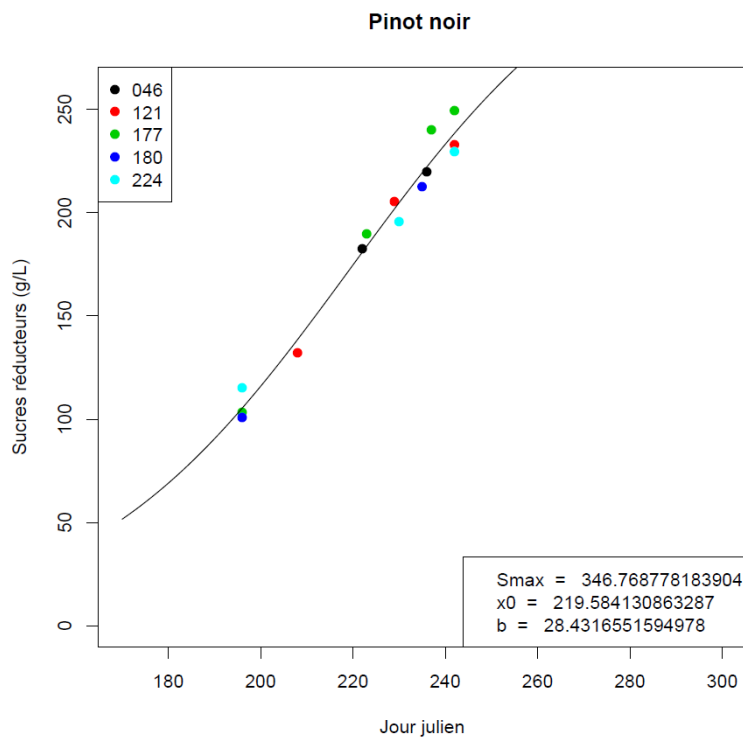


Figure 17 : Ajustement du modèle SADRAS aux données de concentration en sucres réducteurs (g/L) (WineScan) obtenues sur le cépage Pinot Noir au cours de la campagne 2011 de l'essai phénotypage (5 réplicats)

a) Protocole de suivi de la maturation

Quand les raisins atteignent le stade mi-véraison, les suivis de maturation sur le dispositif commencent. Il s'agit de déterminer chaque semaine la composition du raisin pour établir des cinétiques. Pour cela, un échantillon d'une cinquantaine de baies par placette (2 piquetées face à face) est prélevé et analysé à l'aide d'un analyseur IRTF, Infra Rouge à Transformée de Fourier (WineScan commercialisé par la société FOSS). Cet appareil permet une analyse instantanée de l'échantillon sur un grand nombre de variables physico-chimiques : sucres réducteurs, acidité totale (titrable), pH, malate, tartrate, potassium, anthocyanes, Indice de Polyphénols Totaux (IPT), azote assimilable, azote ammoniacal, azote aminé, et autres paramètres que nous n'exploiterons pas ici.

Pour un cépage donné, on peut donc suivre, à raison d'un relevé par semaine, l'évolution d'un grand nombre de variables, pratiquement en temps réel sur les cinq blocs. La figure 11 illustre l'évolution de 8 variables dans les moûts prélevés en 2011 pour le cépage Carmenère N. Les courbes retrouvées sont typiques, une augmentation progressive du degré Brix (~taux de sucre) va de pair avec une diminution de la concentration en acides organiques (malique et tartrique). Tandis que des composés comme les anthocyanes ou le potassium se concentrent, les baies grossissent et le poids de 100 baies augmente en conséquence.

Parallèlement, des dosages et des mesures de référence sont effectués sur ces échantillons, pour étalonner l'analyseur IRTF. La collecte des baies et l'analyse des moûts est une tâche longue, et il est impossible de prélever tous les cépages au même moment. Les prélèvements se répartissent donc sur 3 jours par semaine (un cépage est toujours prélevé le même jour). La structure du tableau de données obtenu est présentée ci-dessous,

Tableau 3 : Structure du tableau de données maturation 2011

		Var quanti 1	Var quanti 2	Var quanti 3	...	Var quanti 20
echA1 date1	} X échantillons					
echA2 date1						
...						
echB1 date2	} Y échantillons					
echB2 date2						
...						
echC1 date3	} Z échantillons					
echC2 date3						
...						

Tableau 4 : Valeurs des paramètres du modèle Sadras ajustés pour chaque cépage de l'essai phénotypage (données 2011) - les valeurs manquantes sont liées à un échec d'ajustement

cépage	Smax	x0	b
Arinarnoa N	226.3	214.7	12.1
Asyrtiko B	225.7	212.2	14.3
BX 648 Rouge			
BX 9216 Blanc	216.8	199.8	12.9
Cabernet franc N	209.1	210.6	7.4
Cabernet Sauvignon N	212.8	208.8	10.5
Carignan N	169.4	218.4	3.4
Carmenère N	194.7	203.8	7.5
Castets N	241.8	210.2	10.3
Chardonnay B	232.1	192.3	20.3
Chasselas B(réfprécoce')			
Chenin blanc	244.0	207.0	13.9
Cornalin N	215.0	212.2	8.9
Cot N	216.4	203.8	9.7
Gamay N(réf précoce')			
Grenache N	219.6	209.0	14.6
Hibernal Blanc	234.4	203.7	8.8
Liliorila B(Baroque * Chardonnay)	228.0	201.4	14.3
Marselan N	217.9	210.0	11.1
Merlot N	234.1	210.3	8.2
Morrastel N(Graciano)	201.0	214.1	9.9
Mourvèdre N			
MPT 3156-26-1 Blanc	220.3	211.7	14.5
MPT 3160-12-3 Rouge	163.0	202.0	6.3
Muscadelle B	236.8	211.1	12.0
Petit Verdot N			
Petite Arvine B	239.9	212.9	11.7
Pinot noir			
Prunelard N	216.8	211.6	9.7
Riesling B			
Rkatsiteli B	215.6	211.5	11.6
Roussanne B	260.9	214.0	9.7
Sangiovese N(Niellucio)	247.3	215.7	30.0
Saperavi N	272.6	209.6	15.2
Sauvignon blanc			
Sémillon B	221.7	200.5	16.4
Tannat N			
Tempranillo N	212.6	206.4	13.5
Tinto Cao N	226.0	211.6	11.1
Touriga Francesa N			
Touriga Nacional N	211.0	208.7	9.7
Ugni blanc	219.8	217.8	14.0
Viognier B	258.9	206.3	15.4

b) Caractérisation des cépages à l'aide du modèle retenu pour la cinétique des sucres réducteurs.

Comme évoqué dans la partie C. 1., nous avons cherché à l'aide du modèle de Sadras (2008) à caractériser la cinétique de maturation des cépages de l'essai phénotypage.

Sur les données disponibles (année 2011), les prélèvements n'avaient pas été effectués en vue d'analyser les cinétiques de maturation (i.e. de manière hebdomadaire, pour tous les cépages, sur les 5 blocs), et il était impossible d'ajuster un modèle par placette (nombre de points insuffisants). Le modèle a tout de même pu être ajusté par cépage, ce qui donne une première indication intéressante (une valeur par cépage). La figure 16 montre le résultat de l'ajustement pour un cépage blanc, Rkatsiteli B, en 2011, avec $S_{max}=216\text{g/L}$.

Même en ce début d'étude, nous avons observé que certains cépages semblaient mal adaptés au contexte pédoclimatique du dispositif dans la mesure où il est difficile de les amener à un plateau avec une teneur en sucres \geq à 200 g/l (état de maturité). Cette approche de modélisation permet de les identifier facilement car si le raisin ne parvient pas à maturité, le nombre de prélèvements possibles est réduit et l'ajustement de la sigmoïde se solde par des valeurs aberrantes (S_{max} très élevée notamment), voire un échec. Le Pinot noir (figure 17) montre ainsi un mauvais ajustement, lié à une forte dégradation des baies qui a eu lieu avant l'obtention d'un palier de concentration en sucres.

Bien entendu, c'est sur la durée de l'étude que nous pourrons nous rendre compte des spécificités de chaque cépage, dans le contexte pédoclimatique du Bordelais. **A l'avenir, les prélèvements devraient permettre d'ajuster le modèle non seulement sur l'ensemble des placettes d'un cépage, mais aussi indépendamment sur chaque placette, et donc d'étudier les paramètres ajustés avec répétition, afin de pouvoir les mettre en regard de la phénologie et/ou des données analytiques (Analyse de Variance, ACP...).**

c) Caractérisation analytique des moûts à surmaturité

Nous avons pu établir une méthode permettant de caractériser les cinétiques d'accumulation des sucres de chaque cépage, mais l'analyse systématique des moûts a permis d'évaluer un grand nombre de paramètres (en partie exposés dans la figure 11). Compte tenu de la richesse de l'information disponible, nous nous sommes intéressés en particulier à la valeur des paramètres à un stade clé : la maturité.

Comme nous l'avons expliqué dans la partie bibliographique, la maturité est un état très délicat à définir et afin de caractériser les cépages, nous avons souhaité comparer la composition de leurs baies, tout en évitant de les comparer à deux stades de maturité différents. Pour cela nous nous avons retenu uniquement le dernier relevé effectué pour chaque placette en 2011, ce qui correspond théoriquement à un stade « surmaturité », mais supposé comparable entre les cépages. Pour une meilleure lisibilité et pertinence des variables, les analyses des cépages blancs et des cépages noirs ont été séparées.

Les données se présentent alors comme deux tableaux d'une centaine d'individus (placettes uniques) contre une vingtaine de variables quantitatives dont une dizaine d'intérêt réel. Par souci d'homogénéité, les variables utilisées dans cette analyse sont celles prédites par le WineScan et non les mesures de référence trop peu nombreuses.

Afin de visualiser les principales dimensions de variabilité entre les cépages, nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) dont les graphiques des individus et des variables (1^{er} plan) sont reportés ci-contre. L'ACP est centrée et réduite car les variables ne s'expriment pas dans les mêmes unités. L'exemple présenté ici ne s'intéresse qu'aux cépages blancs.

Le premier plan factoriel, reporté dans les figures 18 et 19, exprime plus de 60% de la variabilité du jeu de données actif.

Le graphe des individus montre que les cépages forment plus ou moins clairement des îlots et sont donc assez homogènes en terme de composition des moûts. Si nous identifions les dates de récolte par des couleurs (annexe 2), nous observons généralement les dates les plus précoces en haut à gauche et les dates plus tardives en bas à droite. Il existe donc un gradient (qui reste assez peu marqué), lié à la date du dernier prélèvement d'un cépage.

Il est donc utile, en observant les graphes de maturation par cépage tels que ceux présentés dans la figure 11, de s'assurer que le dernier relevé des cépages représenté dans l'ACP correspond bien à un stade de plateau. Cela semble être le cas pour l'ensemble des cépages blancs (sauf le Chasselas, qui a été retiré de l'analyse).

Le graphe des variables donne une projection des variables sur le plan formé par les deux composantes principales. En noir, les variables qui ont servi à construire le plan (acidité totale, sucres réducteurs, poids de 100 baies, indice de polyphénols totaux, azote assimilable, pH), en bleu la projection de huit variables supplémentaires. Trois groupes de variables se détachent : l'acidité (TotalAcid, Malate, Tartrate), les sucres (Brix, ReducingSugar), et le poids de 100 baies. L'indice de polyphénols totaux et l'azote assimilable sont principalement liés à l'axe 3, et assez antagonistes. Ces derniers semblent bien moins liés à la date, et de fait à la maturité.

A partir de là, nous pouvons dégager des cépages plus acides (bien que potentiellement un peu moins en surmaturité compte tenu de l'effet date) : Riesling, petite Arvine, Liliorila, et d'autres moins acides comme le Sémillon. Le taux de sucre oppose des cépages comme la Roussanne ou le Viognier (très riches en sucre) au Riesling par exemple. Le poids de 100 baies oriente lui l'axe 2 qui oppose des petites baies (Petite Arvine, Hibernial), à des raisins plus gros (Asyrtiko, Rkatsiteli...).

L'ACP permet ainsi de mettre en évidence les principales dimensions de variabilité entre les moûts de raisin à maturité/surmaturité. Ce sont les concentrations en sucre et en acide qui montrent la plus forte variabilité par rapport à des paramètres comme l'azote ou les polyphénols. De plus, même si cela reste à confirmer, il semble que des cépages précoces restent plus acides à surmaturité que des cépages tardifs (date de dernier prélèvement en septembre). Sur le millésime étudié, nous pouvons penser que les cépages dont la date de dernier prélèvement est précoce ont eu une mauvaise « tenue sur pied » (baies flétries, desséchées précocement) et de fait n'ont pas dégradé tous les acides comme attendu

classement des cépages à surmaturité pour ReducingSugar

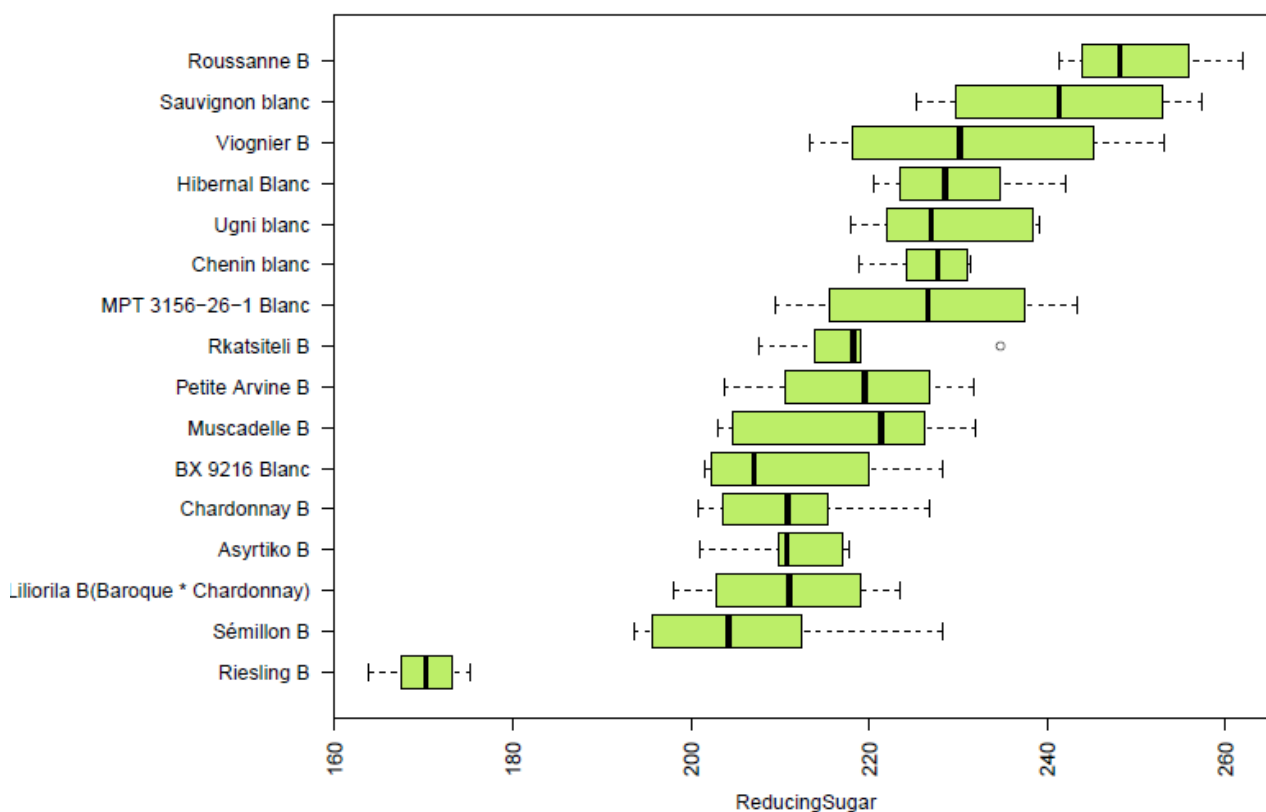


Figure 20: Boxplot des sucres réducteurs en fonction du cépage dans les moûts des cépages blancs au dernier prélèvement 2011

trt	means	M	N	std.err	LCI	UCI
Roussanne B	249.9	a	4	4.4	241.1	258.6
Sauvignon blanc	241.4	ab	4	7.2	227.0	255.7
Viognier B	232.0	abc	5	7.6	216.7	247.2
Hibernat Blanc	229.9	abc	5	3.9	222.1	237.6
Ugni blanc	228.9	abc	5	4.3	220.4	237.5
Chenin blanc	226.6	abc	5	2.3	221.9	231.3
MPT 3156-26-1 Blanc	226.5	abc	4	7.2	212.1	240.9
Rkatsiteli B	218.7	bc	5	4.5	209.7	227.7
Petite Arvine B	218.6	bc	4	5.8	207.0	230.3
Muscadelle B	217.5	bc	5	5.8	205.8	229.1
BX 9216 Blanc	211.8	c	5	5.3	201.3	222.4
Chardonnay B	211.5	c	5	4.6	202.2	220.7
Asyrtiko B	211.2	c	5	3.0	205.2	217.3
Lilorila B(Baroque * Chardonnay)	210.9	c	4	5.4	200.2	221.6
Sémillon B	206.8	c	5	6.3	194.2	219.5
Riesling B	170.0	d	5	2.0	165.9	174.0

Tableau 5 : Résultat du test de comparaisons multiples (Bonferroni) pour les sucres réducteurs dans les moûts des cépages blancs au dernier prélèvement 2011

Afin d'affiner les conclusions de l'analyse exploratoire nous nous sommes ensuite intéressés plus en détail à chaque variable. Pour savoir quels cépages différaient les uns des autres sur leur dernier prélèvement pour tel ou tel paramètre, nous avons réalisé autant d'analyses de variance à un facteur (cépage) avec test de comparaison multiple (correction de Bonferroni) qui indique les groupes de cépages significativement différents. Ce type d'analyse est disponible pour toutes les variables, cépages blancs et noirs séparés. Un exemple est présenté ci-contre (Figure 20 & tableau 5).

La plupart des cépages ont un taux de sucres réducteurs final compris entre 200 et 240 g/L environ, ce qui correspond aux observations de terrain. Nous pouvons distinguer quatre groupes qui sont en accord avec les résultats de l'ACP. Le groupe a contient les 8 cépages les plus sucrés assez bien représentés à droite sur le graphe des individus, tandis que les groupes b et c contiennent pratiquement tous les cépages analysés ici. Le groupe d ne contient que le Riesling, qui est particulièrement pauvre en sucre (à l'extrême gauche sur le graphe des individus).

Ce test classique ne met pas en évidence une grande variabilité du taux de sucre à maturité entre les cépages blancs. Toutefois nous rappelons qu'il n'y a que cinq échantillons par cépage. Cette analyse est à poursuivre sur plusieurs années en incluant des facteurs millésime et éventuellement bloc.

L'étude de la maturation que nous venons d'effectuer nous a permis à travers l'ajustement des courbes de maturation en sucre et de la description des goûts à maturité/surmaturité, de commencer à caractériser les cépages de la parcelle phénotypage. Mais nous devons anticiper le fait que les données de maturation, mais aussi de phénologie ne seront véritablement informatives qu'au fil des années.

D. Analyses à prévoir

Les données issues de l'essai phénotypage sont nombreuses et variées. Si nous faisons le bilan de ce qui est déjà disponible pour chaque placette (individu statistique), nous disposons de :

- Date et somme de températures de mi-débourrement
- Date et somme de températures de mi-floraison
- Date et somme de températures de mi-véraison
- Paramètres ajustés S_{max} , x_0 et b caractérisant la cinétique de maturation des sucres
- Dosages de sucres, acides, anthocyanes, polyphénols, azote, ... tout au long de la maturation, et en particulier à maturité/surmaturité

Afin de garder assez de recul sur ces nombreuses données très riches, qui vont s'accumuler au fur et à mesure des années, il est souhaitable de mettre en place des tableaux synthétiques qui pourront servir à des analyses efficaces.

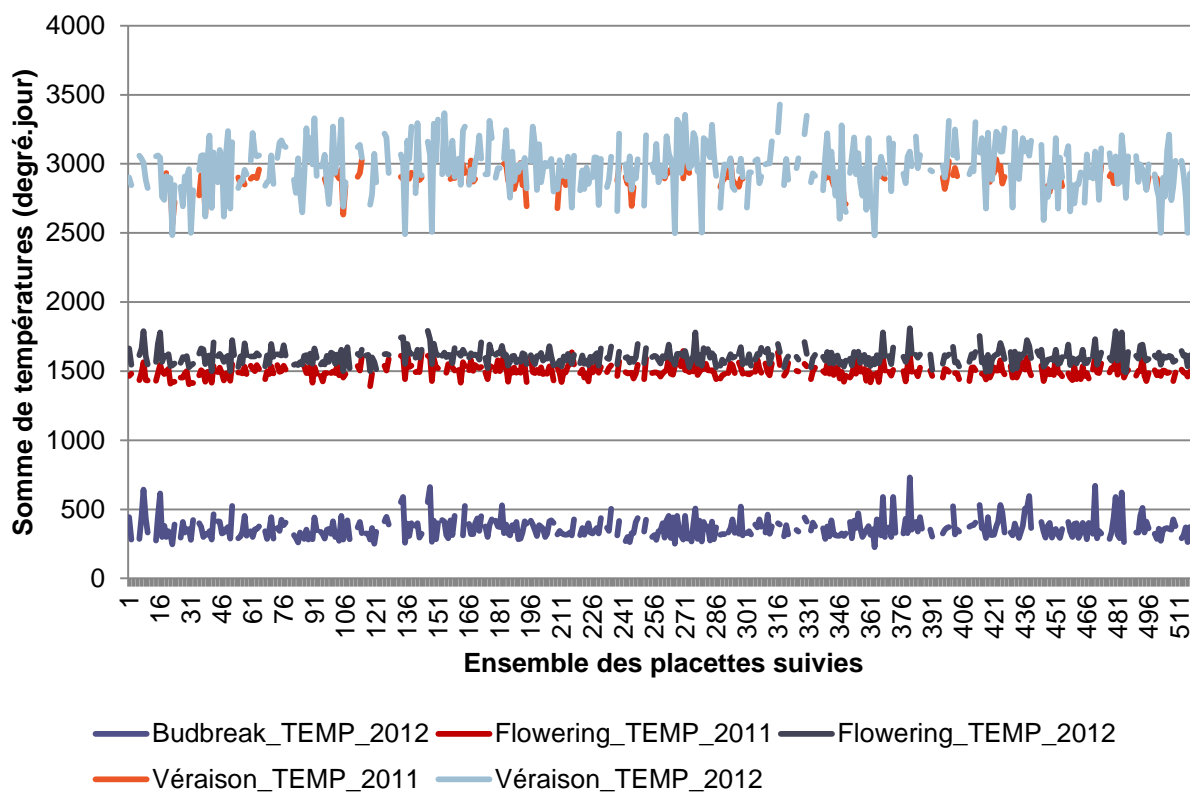


Figure 21 : Représentation de toutes les sommes de température de mi-stade disponibles par placette : débourrement, floraison et véraison en 2011 et 2012

Tableau 6 : Moyennes et écart-types des sommes de températures à différents stades phénologiques en 2011 et 2012 sur l'essai phénotypage

	Budbreak_2012	Flowering_2011	Flowering_2012	Véraison_2011	Véraison_2012
ST moyenne:	363,76	1502,18	1604,90	2888,56	2971,53
Ecart-type:	73,44	46,01	52,93	80,79	172,49

La figure 21 illustre les sommes de températures (base 0°C au 1^{er} Janvier) d'atteinte des 3 stades phénologiques étudiés (mi-débourrement, mi-floraison et mi-véraison) en 2011 et 2012 (la donnée débourrement 2011 est manquante) pour l'ensemble des individus statistiques disponibles. Nous remarquons tout d'abord que la variabilité n'est pas identique entre les stades : l'écart-type est d'une cinquantaine de degrés jours pour le stade floraison, alors qu'il s'élève à plus de 70 degrés jours pour les autres stades. Le très fort écart-type observé pour la véraison 2012 est probablement lié aux grandes variations de la température moyenne journalière durant cette période.

Par ailleurs, l'année 2011 a été plus précoce : somme de températures de mi-floraison et somme de températures de mi-véraison sont toutes les deux inférieures aux sommes de températures correspondantes en 2012. Cette avance pourrait être liée à l'âge de la vigne. En effet, des pieds plus jeunes sont enracinés moins profondément dans le sol, et atteignent donc plus rapidement la température de reprise d'activité à la sortie de l'hiver. Cela entraîne un décalage de l'ensemble des stades phénologiques.

En dehors de cet effet « vigne jeune », qui devrait s'atténuer dans le futur, il existe en viticulture un effet millésime très fort. Si nous voulons caractériser les cépages aussi bien que les années, il faudra tenir compte de l'effet millésime dans les analyses. A l'image de l'ACP que nous avons mise en œuvre, l'utilisation d'analyses factorielles multiples (AFM) par exemple, en hiérarchisant judicieusement les variables (variable au-dessus de année), peut permettre de s'affranchir partiellement de l'effet millésime.

Pour les analyses de variance, les tableaux de données et les modèles devront bien entendu être construits en incluant un facteur année.

Ceci conclut la partie mise en place du système de traitement des données de phénologie et de maturation. Nous allons maintenant passer à une autre partie de notre étude, qui concerne la calibration de l'analyseur IRTF qui fournit les données de maturation.

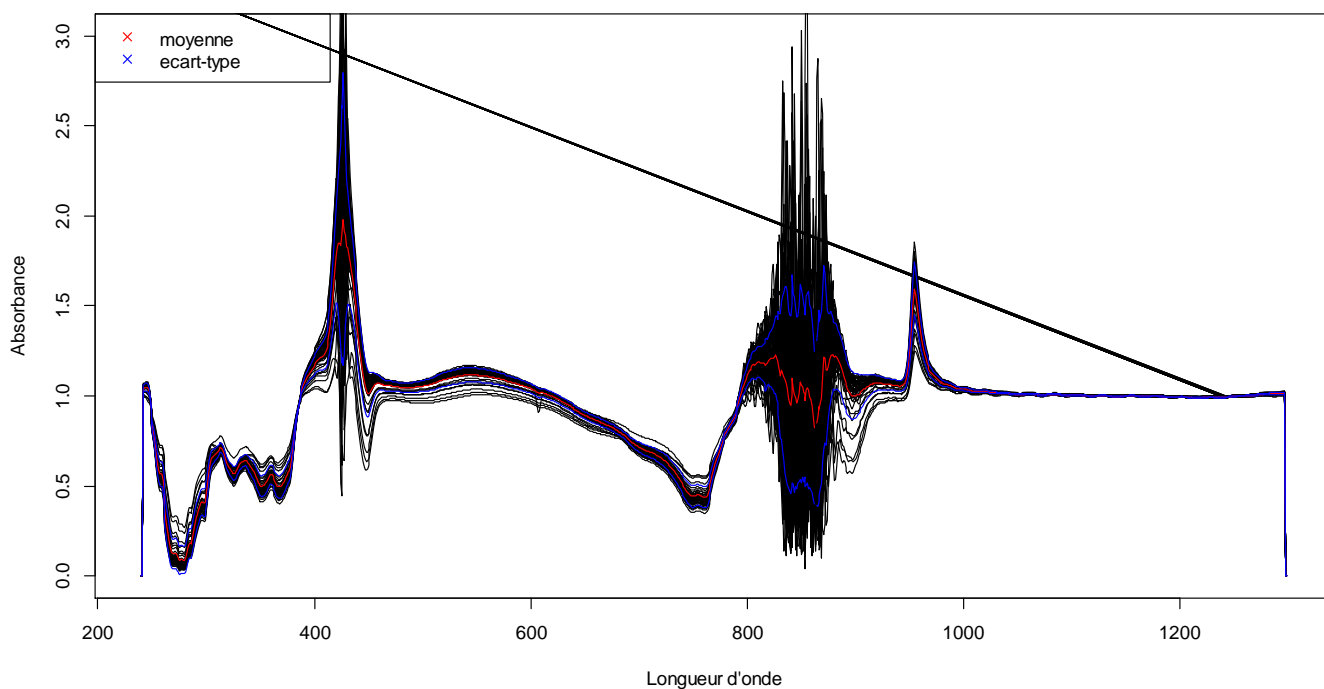


Figure 22 : Visualisation de 50 spectres d'absorbance avec le spectre moyen et les écarts types sur les échantillons de la campagne 2011

Tableau 7 : Structure du tableau de données maturation 2011 (WS : WineScan)

Id	date	Brix	Brix WS	Ac Tot	Ac Tot WS	Antho WS	... Var WS	... Var WS
A	1									
B										
C										
B	2									
C										
E										
F										
G										
...	...									

5 variables avec une mesure de référence
X variables WS uniquement

III. Calibration de l'analyseur IRTF

A. Contexte

Comme indiqué dans le protocole de suivi de maturation C. 2., l'ampleur des données suppose une importante quantité de prélèvements chaque semaine sur la parcelle. En effet, 2600 pieds sont considérés pour les prélèvements hebdomadaires, ce qui génère 260 analyses par semaine sur de nombreuses variables pendant plus de 3 mois (différence de précocité des cépages). Pour répondre à ce besoin, le laboratoire s'est équipé en 2011 d'un analyseur IRTF permettant d'estimer rapidement un grand nombre de variables des moûts issus des baies prélevées sur la parcelle.

B. Notion de calibration

L'analyse d'un échantillon de moût par L'IRTF consiste à mesurer la valeur d'absorbance de cet échantillon pour une plage de longueurs d'onde entre 250 et 1300 nm. Cette valeur est dépendante des fonctions chimiques présentes dans l'échantillon. En effet, quand l'énergie apportée par le faisceau lumineux à une/des longueur/s d'onde donnée/s est proche de l'énergie de vibration de la liaison, cette dernière va absorber le rayonnement. Compte tenu de la composition très riche d'un moût, le spectre obtenu est très complexe et un pic d'absorbance ne peut être associé à un composé unique. Il est toutefois possible de prédire, à l'aide d'un apprentissage préalable et de méthodes statistiques adaptés, la quantité d'un soluté dans l'échantillon. Cette démarche d'apprentissage et de modélisation est appelée calibration.

L'analyseur (WineScan FOSS), est livré avec une calibration dite « commerciale », qui repose sur des mesures de référence réalisées par des laboratoires d'œnologie, et donc sur des moûts à des stades proches de la maturité. Or sur le dispositif phénotypage, les raisins sont prélevés dès la mi-véraison –stade bien plus précoce- et sur des cépages inconnus (hybrides résistants et variétés non cultivées en France, cf. annexe 1). Nous pouvons donc nous interroger sur la justesse des prédictions de l'appareil sur certains de nos échantillons.

Un autre objectif du stage était donc d'initier la calibration « locale » de l'analyseur, afin de pouvoir après quelques campagnes, réduire fortement le nombre d'analyses de référence, qui prennent actuellement beaucoup de temps et de moyens humains et financiers.

C. Présentation des données et des méthodes

N.B. : La rédaction de cette partie est largement appuyée sur l'ouvrage Bertrand & Dufour, 2006

1. Données disponibles

Tous les échantillons de moût prélevés en 2011 ont été passés en jus frais à l'analyseur infra-rouge. Nous disposons de plusieurs types de données :

- Les données spectrales, soit environ 800 spectres « bruts » qui décrivent l'absorbance de l'échantillon pour des longueurs d'onde entre 250 et 1300 nm (figure 22)
- Les valeurs pour chaque paramètre (une vingtaine) fournies par le modèle installé sur l'appareil
- Les valeurs mesurées au laboratoire pour 5 des paramètres (acidité totale, degré Brix, malate, tartrate, pH)

Individuals factor map (PCA)

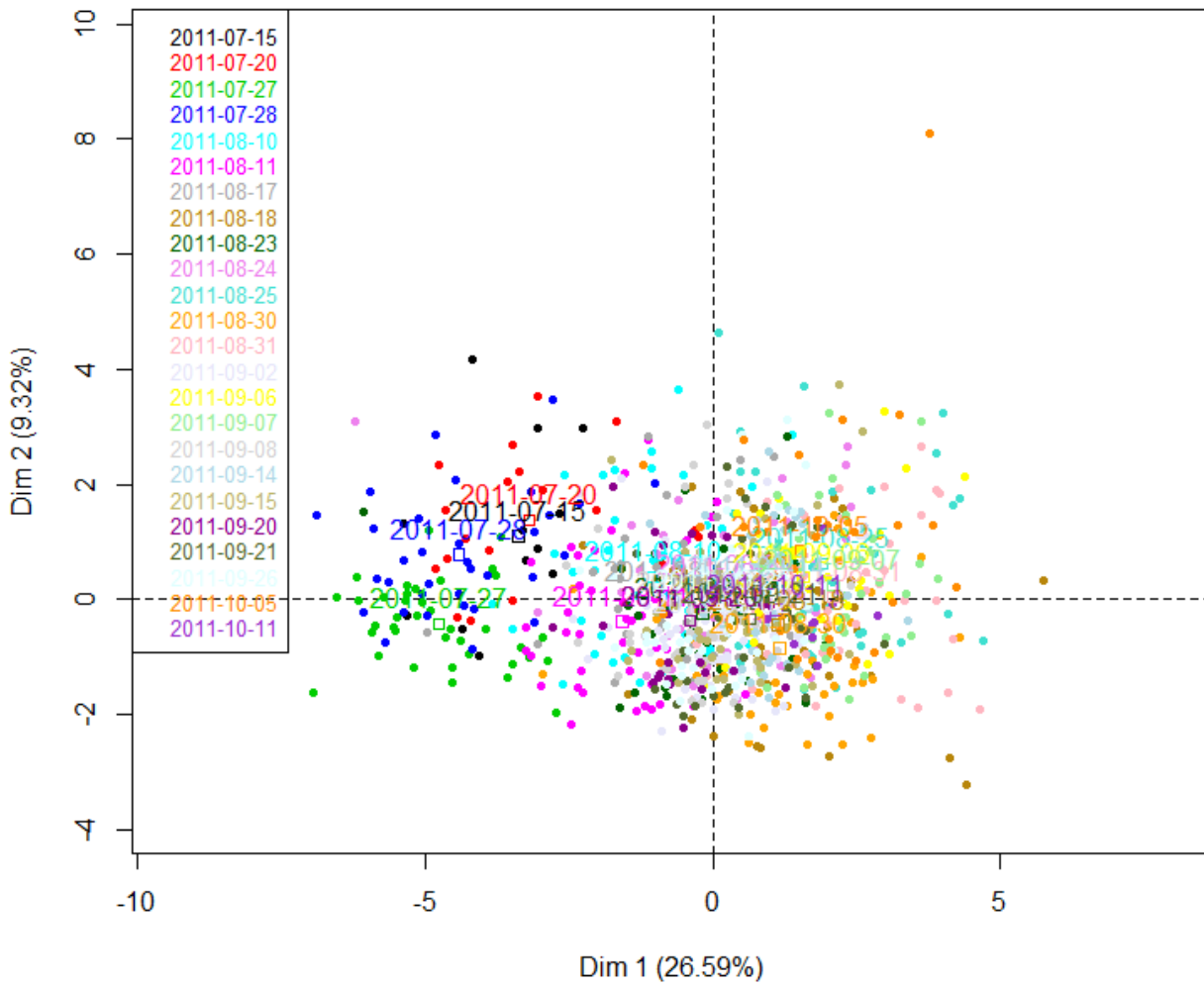


Figure 23 : Graphe des individus de l'ACP réalisée sur les données spectrales des échantillons 2011, colorié par date

2. Examen de la collection spectrale par une ACP :

Le tableau de données de spectres, soumis à l'analyse en composantes principales est constitué d'environ 800 individus (échantillons) pour lesquels 1060 variables d'absorbances ont été mesurées.

Cette première approche exploratoire permet de détecter d'éventuels individus aberrants, ainsi qu'une potentielle structure apparente (groupes de spectres). L'ACP est centrée mais non réduite, car nous souhaitons tenir compte de l'intensité de la variabilité pour chaque longueur d'onde (hauteur des pics).

Nuage des individus : A l'issue de cette analyse (cf. annexe 5), nous avons pu détecter un certain nombre de spectres notés H2O qui correspondent à de l'eau, et les retirer du fichier car ces derniers s'écartent du nuage et ne nous intéressent pas. De façon moins claire, deux groupes semblent se dessiner suivant la première composante principale.

Graphe des variables : Le nuage des variables (annexe 6) permet de mettre en évidence les longueurs d'ondes (pics) qui différencient le plus les échantillons. Ainsi il existe un pic autour de 427 nm fortement lié à la dimension 1, un autre autour de 840 nm plus large, et plutôt lié à une deuxième dimension orthogonale. Nous pouvons projeter en supplémentaire sur ce graphe les mesures des dosages afin de voir si ces dernières sont liées aux dimensions principales.

Aucune variable de dosage ne semble liée au pic à 840 nm. Toutes les variables semblent corrélées positivement ou négativement avec l'axe 1, et en particulier les acides (malique, totaux,...). Le nuage des individus avec un code couleur par date (figure 23) montre bien une évolution des spectres le long de la première composante principale selon que les moûts sont verts ou plus mûrs. Il existe visiblement au moins un pic tout simplement lié à la maturité du raisin, et ce vraisemblablement *via* la concentration en acides dans les moûts...

3. Méthodes de calibration

a) Méthodes prédictives en spectroscopie

Les valeurs d'absorbance qui forment les spectres reposent avant tout sur les propriétés d'interaction complexes entre les liaisons moléculaires et la lumière *via* des phénomènes de résonance. Les méthodes prédictives utilisent les valeurs d'absorbance pour déterminer la concentration d'un soluté grâce à un apprentissage préalable.

En résumé, nous souhaitons expliquer une variable quantitative (la concentration d'un composé) par plusieurs autres variables quantitatives (les valeurs d'absorbance pour chaque longueur d'ondes). Pour ce faire, il paraît sensé d'envisager une régression linéaire multiple, mais la nature des données spectroscopiques entraîne des difficultés particulières. D'une part, il existe un lien très fort entre les variables spectrales qui augmente la variance des estimateurs ; on parle de quasi-colinéarité. D'autre part, le grand nombre de variables en présence compromet les calculs d'ajustement lorsqu'il n'y a pas assez d'individus (degrés de liberté).

Une solution consiste à faire une régression pas à pas, en sélectionnant les variables une à une sur un critère comme l'AIC (Akaike Information Criterion) par exemple. Dans tous les cas, il faut opérer une sélection de variables prédictives. Nous avons envisagé deux méthodes couramment utilisées : la régression sur composantes principales, et la régression Partial least Squares (PLS).

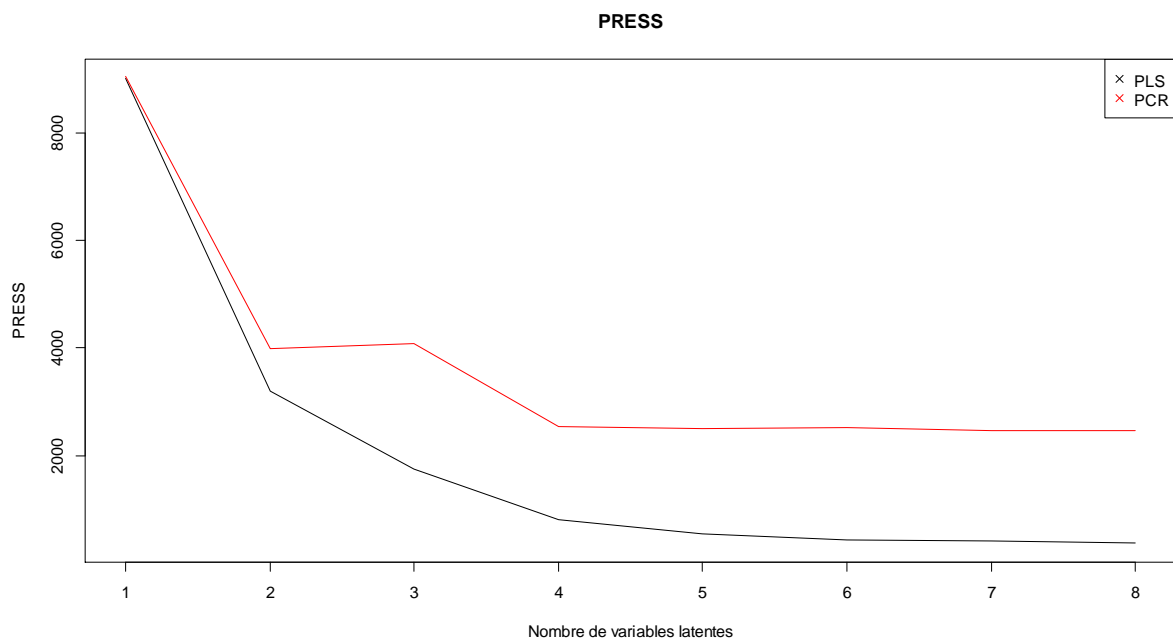


Figure 24 : Somme des carrés des écarts de prédiction en fonction du nombre de composantes introduites dans des modèles PCR et PLS pour la variable acidité titrable

b) Utilisation de la régression sur composantes principales (PCR)

Le modèle construit est un modèle de régression linéaire dans lequel les variables prédictives sont les composantes principales du jeu de données spectres (X) introduites dans l'ordre décroissant de leur valeur propre.

Les variables prédictives sont donc par construction orthogonales entre elles et apportent ainsi chacune une information nouvelle au modèle. Ceci permet de contourner le problème de la forte colinéarité entre les variables. Il est toutefois opportun de ne sélectionner qu'une partie des composantes principales (les plus grandes valeurs propres) et le nombre de composantes est donc choisi sur critère visuel du PRESS (sum(sqrt(residus))) en validation croisée. (Source : Bertrand & Dufour, 2006)

c) Utilisation de la régression PLS

Le principal intérêt de la régression PLS par rapport à la PCR, est qu'elle tient compte de la variable à prédire. En effet, les variables sont sélectionnées non pas sur l'intensité de leur variance, mais sur l'intensité de leur relation avec la variable à prédire. Les performances de prédiction de cette méthode sont donc *a priori* meilleures.

D. Mise en œuvre de méthodes prédictives pour l'étalonnage de l'analyseur : l'exemple de l'acidité titrable (AT).

Nous illustrerons la procédure de calibration par l'exemple de l'AT car sa mesure de référence est réalisée sur jus frais, elle est fiable, et largement disponible sur les échantillons.

1. Comparaison PCR/PLS

Sur la figure 24 ci-contre, nous observons le PRESS (Prediction Residual Sum Square) en fonction du nombre de composantes introduites dans les modèles. L'erreur de prédiction faite par les régressions PLS est toujours inférieure à celle des PCR. Le nombre de composantes optimal a été évalué autour de 4 à 6 variables latentes. Au-delà, la diminution de l'erreur devient trop faible pour être profitable en regard de la complexité du modèle (sur-ajustement).

$$PRESS = \sum_{i=0}^n (y'i - yi)^2$$

Etant donnée sa nette supériorité, nous avons par la suite mis en œuvre la méthode PLS.

Pour pouvoir évaluer, et donc comparer les performances des différentes calibrations, nous avons déterminé un critère qui rend compte de la qualité de prédiction d'un modèle. Le critère utilisé par la société FOSS est l'*écart-type de précision*, c'est-à-dire « l'écart type des écarts entre prédiction appareil et méthode de référence » (source : C. Jouet, Ingénieur Produit Vin FOSS). Selon les cas de figure, nous avons donc été amenés à calculer un écart-type de prédiction (SEP), de calibration (SEC), ou de validation croisée (SECV)...

$$SE - X = \sqrt{\frac{1}{ddl} \sum_{i=0}^n (y'i - yi)^2}$$

2. Etalonnage

Cette étape d'étalonnage a permis de sélectionner le modèle, c'est-à-dire le nombre de variables latentes en utilisant une validation croisée (trois segments). La qualité de l'ajustement est alors caractérisée par la SEC (Standard Error of Calibration).

Pour l'acidité titrable sur les données 2011, le modèle retenu a 6 variables latentes et SEC_PLS=0.55

3. Validation sur un échantillon indépendant

Cette étape a consisté à tester le modèle sur un échantillon indépendant, qui n'a pas servi à sa construction. En l'occurrence on sélectionne au hasard un tiers des individus qui sont écartés lors du calcul des coefficients PLS. Cette procédure a été répétée une quinzaine de fois et l'erreur moyenne de prédiction a ensuite été observée. SEP_PLS_Moy=0.55

Le SEP trouvé semble étonnamment proche du SEC, cela s'explique probablement par le grand nombre d'échantillons disponibles : le modèle n'apprend pas beaucoup moins bien sur 2/3 des données que sur la totalité.

Dans le tableau ci-dessous se trouve le bilan des résultats sur les différents paramètres disponibles en analyse de référence

paramètre	SEP_Comm	SEC_PLS	SEC_PCR	SEP_PLS_Moy	SEP_PLS_sd
Brix	1.68	0.34	0.79	0.32	0.04
Acidité Totale	0.47	0.55	1.71	0.55	0.06
Acide Malique	0.52	1.12	1.90	1.10	0.04
Acide tartrique	0.94	1.10	1.27	1.10	0.03
pH	0.10	0.12	0.18	0.12	0.01
Sucres Réducteurs	39.19	27.52	29.02	27.19	2.89

4. Présélection des zones spectrales utilisées pour la PLS

Pour essayer de réduire l'erreur liée à la prise en compte de bruit dans les modèles, on refait l'analyse en sélectionnant les longueurs d'ondes (zones pin) 250-405; 445-470; 700-770 indiquées par C. Jouet comme étant les zones d'intérêt du spectre (communication personnelle) :

paramètre	SEC_PLS	SEC_PCR	SEP_PLS_Moy	SEP_PLS_sd
Brix	0.27	0.27	0.26	0.07
Acidité Totale	0.41	0.49	0.42	0.10
Acide Malique	0.44	0.78	0.46	0.06
Acide tartrique	0.56	0.85	0.55	0.04
pH	0.09	0.09	0.09	0.00
Sucres Réducteurs	26.86	27.50	26.93	2.61

La comparaison de ces deux tableaux montre que la sélection préalable des zones d'intérêt connues permet de réduire l'écart type de prédiction moyen pour presque tous les paramètres testés (sauf le pH, dont la mesure de référence est du reste peu fiable). En revanche, l'écart-type du SEP augmente, ce dernier est donc plus instable en fonction des échantillons à prédire lorsque tout le spectre n'est pas disponible.

Acidité Totale donnée par l'analyseur IRTF en fonction de l'acidité totale dosée

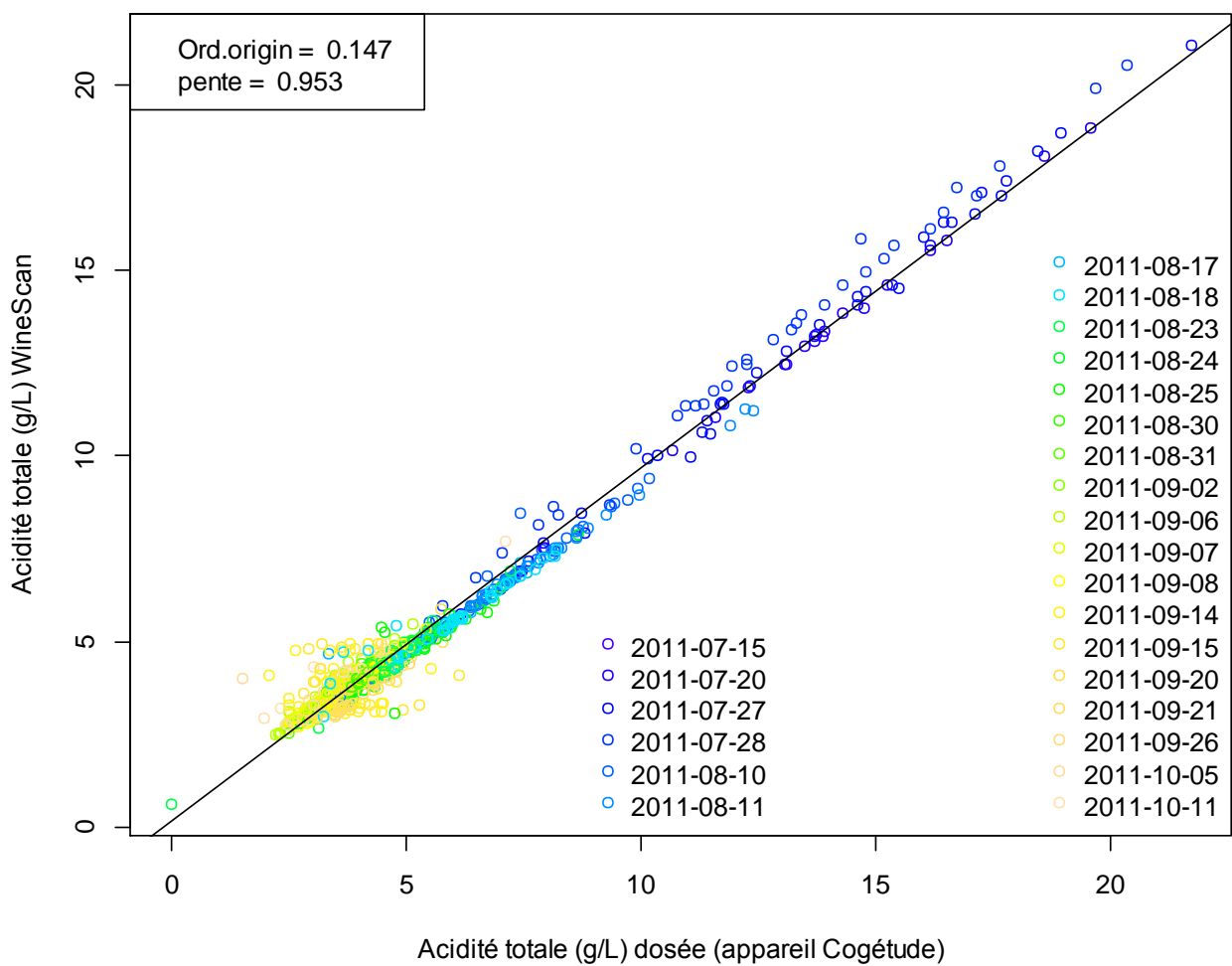


Figure 25 : Acidité totale prédite par la calibration commerciale en fonction de l'acidité totale mesurée, coloriée par date de récolte

Une calibration utilisant uniquement certains fragments des spectres peut s'avérer intéressante si une meilleure performance de prédiction se maintient dans les prochaines années en sélectionnant les zones pin. Cependant une partie de l'information spectrale est occultée, et il est possible d'avoir à revenir au spectre total si certains paramètres sont mal prédits.

E. Comparaison avec la calibration commerciale

L'analyseur étant fourni avec une calibration, il s'agit de vérifier s'il est opportun de la remplacer par l'étalonnage réalisé précédemment. Une rapide représentation de la corrélation variable de référence-variable WS (Figure 25) permet de se rendre compte de la qualité de l'estimation, et d'identifier d'éventuelles anomalies. On calcule par ailleurs l'écart-type de précision associé à la calibration commerciale en 2011 : $SEP_Comm = 0.47$

Sur les données 2011, la calibration effectuée sur des fragments de spectres préalablement choisis permet de surpasser la calibration commerciale pour presque tous les paramètres testés.

Toutefois, il existe généralement un effet année sur les données spectrales qui nécessite un réajustement linéaire du modèle de calibration tous les ans. Nous n'avons pas pu en tenir compte, et une étude sur un intervalle de temps plus long permettra de trancher sur la calibration à privilégier.

Cépage	arome 1	...	arome p
1			
...		{0,1}	
n			

Tableau 8 : Tableau des effectifs de chaque arôme de la variable textuelle par cépage

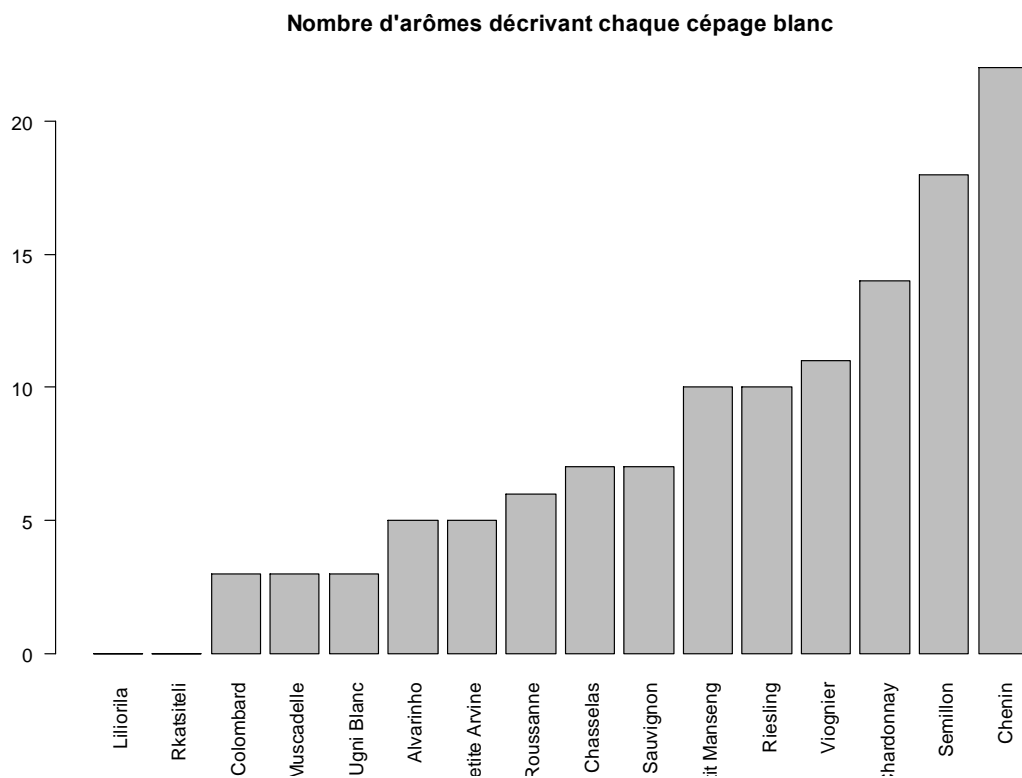


Figure 26 : Barplot du nombre d'arômes contenus dans la variable textuelle des cépages blancs

Pour finir notre étude, nous allons nous intéresser à un aspect essentiel dans la filière vitivinicole puisqu'il s'agit du vin. En effet, c'est bien là l'objet final de toutes les attentions portées à la vigne, et nous nous proposons maintenant de tenter d'évaluer les qualités œnologiques et organoleptiques potentielles des cépages implantés sur la parcelle phénotypage.

IV. Ouverture sur des aspects sensoriels du vin

A. Bibliographie, analyse des correspondances sur les arômes...

En lieu de première approche de la diversité organoleptique des cépages implantés sur la parcelle, on a effectué une synthèse des arômes exprimés par chacun d'eux. Les données -issues d'une recherche bibliographique- sont sous forme d'une variable textuelle regroupant tous les arômes développés par chaque cépage. Elles peuvent être exploitées par une Analyse des Correspondances (AC) sur le tableau des effectifs de chaque modalité de la variable textuelle.

Compte tenu de la séparation nette entre les qualités organoleptiques des cépages noirs et les blancs, deux AC sont réalisées. De plus, les termes à moins de deux occurrences sont éliminés, ainsi que les termes génériques tels que « qualitatif », « intéressant », « complexe »... qui ne caractérisent pas les cépages de façon impartiale.

Exemple de contenu de la variable textuelle brute pour deux cépages blancs :

- *Sauvignon Blanc* : *genêt buis bourgeoncassis pamplemousse sureau passion fumée vianderôtie pierrefusil herbe minéraux menthe pomme*
- *Viognier* : *abricot boisé chèvrefeuille cire citronvert coing fleuramandier aubépine grillé iris mangue miel musc paindépice pêche tabac tilleul violette amande*

Afin de s'assurer de la validité des distances observées dans l'AC, on vérifie la longueur des variables textuelles. En effet, comme l'Analyse des Correspondances utilise la distance du Chi² pour séparer les modalités et les individus, des cépages ayant très peu de descripteurs se retrouvent « sur-éloignés » des autres, et les arômes peu utilisés se retrouvent à la périphérie du nuage ;

Nous observons des différences de longueur entre les variables textuelles. Il faut en tenir compte et ne pas tirer de conclusions trop hâtives.

CA factor map

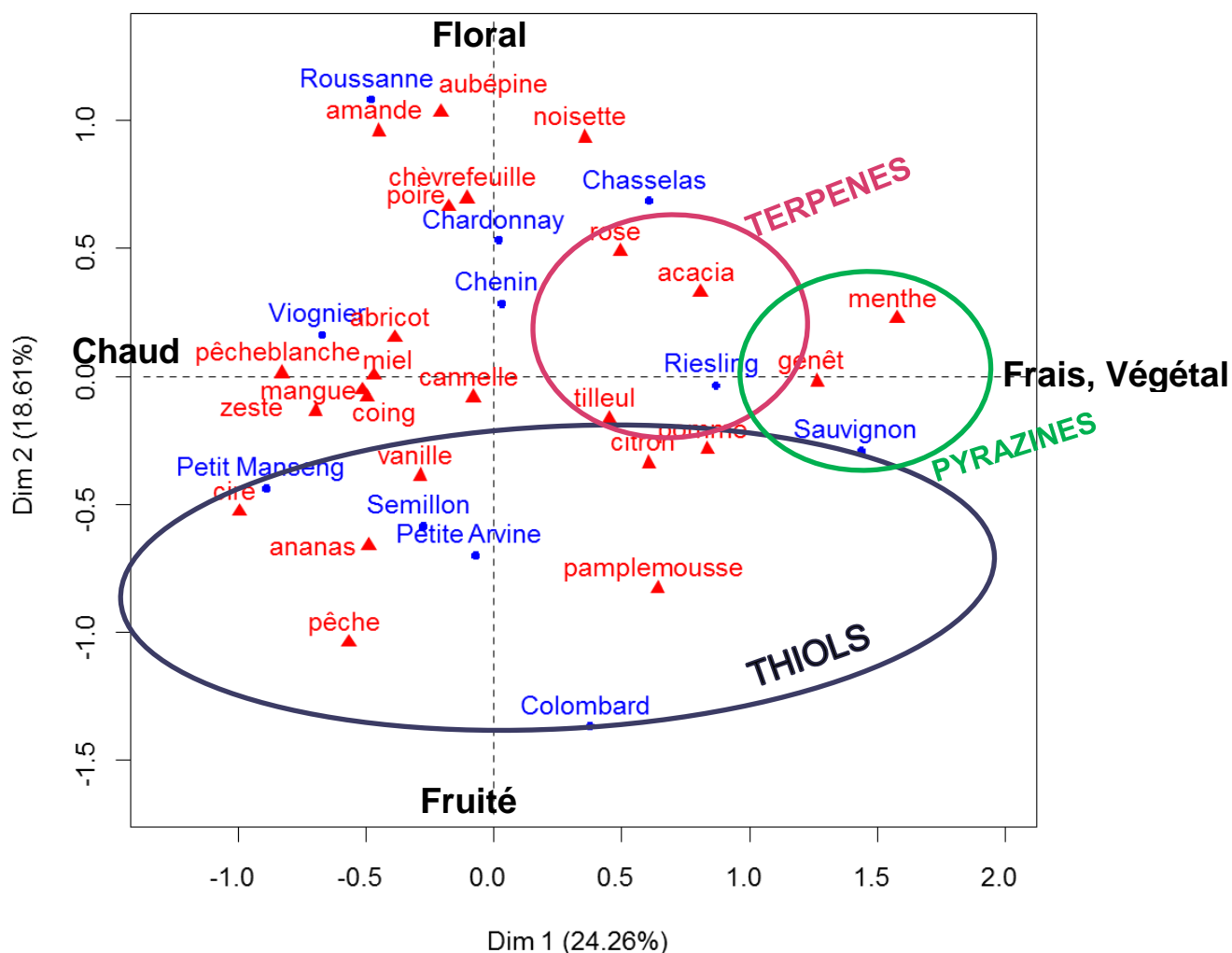


Figure 27 : Graphique de l'AC de la variable textuelle de niveau 3 sur les cépages blancs

```

> dimdesc(res.ca,axes=1:5)
$`Dim 1`
$`Dim 1`$quanti
  correlation  p.value
menthe  0.8196972 0.002010819
citron  0.7113325 0.014104817
genêt   0.6420192 0.033191968
cire    -0.6469225 0.031447439
miel    -0.7731762 0.005256233

$`Dim 4`
$`Dim 4`$quanti
  correlation  p.value
mangue  0.6330745 0.03654692

$`Dim 5`
$`Dim 5`$quanti
  correlation  p.value
aubépine  0.6911471 0.01850789
amande    0.6478422 0.03112752
pamplemousse -0.6325996 0.03673142

$`Dim 3`
$`Dim 3`$quanti
  correlation  p.value
chèvrefeuille 0.6526947 0.02947742
abricot       0.6189718 0.04230555
  
```

Description des dimensions de l'AC (FactoMineR)

Le choix d'effectuer une analyse factorielle des correspondances (AFC ou AC), permet de projeter les cépages au pseudo-barycentre de leurs modalités et inversement. On obtient ainsi une « carte » des arômes exprimés par les cépages.

Sur le graphe de l'AC, qui exprime un peu plus de 40% de la variabilité, on peut interpréter la dimension 2 comme séparant des arômes fruités (pêche, ananas, en bas) d'arômes plus floraux (aubépine, en haut). L'axe 1 sépare lui des notes fraîches et végétales de genêt et de menthe (à droite) de saveurs plus chaudes miellées et épicées à gauche. Ainsi, des arômes préférentiellement associés à la fraîcheur et au fruité, comme les agrumes ou la pomme se trouvent dans le coin inférieur droit.

La projection des cépages sur ce plan permet de situer ce qui caractérise le plus un cépage. Le Sauvignon, placé à droite de l'axe 1 est au pseudo-barycentre de ses modalités, et présente en effet des arômes typiquement verts comme la menthe ou le bourgeon de cassis. Le Viognier n'est lui pas véritablement caractérisé, si ce n'est par des tons plus chauds et floraux.

Les cépages qui ont une description restreinte (Colombard, Chasselas, Roussanne...) se retrouvent comme prévu à l'extérieur du nuage, tandis que le Chenin très renseigné est beaucoup plus central.

On parvient sur ce graphe à identifier des pôles aromatiques associés à de grandes familles de composés chimiques comme les thiols, les terpènes... Ces derniers sont connus pour être associés aux descripteurs mentionnés. Ceci paraît encourageant quant à la validité de l'analyse, malgré les différences du nombre de descripteurs.

B. Pistes pour le recueil et le traitement

Les arômes variétaux sont une composante essentielle dans le produit fini qu'est le vin. Ainsi un cépage bien sous tous rapports en matière de phénologie, de maturation ne sera pas pour autant le candidat idéal. Il est indispensable qu'il soit également apte d'un point de vue organoleptique, et en particulier que le terroir où il est implanté lui permette d'exprimer une certaine typicité (caractéristiques organoleptiques spécifiques d'un terroir).

D'ici 4 à 5 ans, le comportement des vignes de l'essai phénotypage sera stabilisé car l'enracinement sera établi en profondeur. Il deviendra alors possible de faire des micro-vinifications (c'est-à-dire de vinifier une petite quantité de moût) pour chaque cépage afin de caractériser un vin issu de ce cépage sur le terroir bordelais. On peut se poser de nombreuses questions *a priori*, et quelques objectifs pour la dégustation émergent : caractériser l'expression des cépages ?, rapprocher les cépages ?, choisir le « meilleur » cépage pour un type de vin donné ? Rechercher une typicité « bordelaise » ? Etc...

Une première sélection des variétés pourra se faire sur des critères strictement viticoles. Celles qui ne parviennent pas à maturité, qui sont trop sensibles aux maladies, à la sécheresse... peuvent être éliminées de l'analyse. Il est difficile de le décider à ce jour, mais nous pouvons estimer par exemple que 15 cépages noirs et 10 cépages blancs seront à évaluer. Les séances pourraient regrouper un jury de 20 dégustateurs (étudiants ou professionnels).

Afin de valider les arômes variétaux mis en évidence dans l'analyse des correspondances, un questionnaire type de description sensorielle avec des cases à cocher si l'arôme est présent (Levassort) dans le vin peut être mis en place, complété par une question de type « Ce vin est-il un bon exemple de vin de Bordeaux ? » (Symoneaux *et al.*,) qui permettra d'évaluer la typicité exprimée par les cépages, et une question d'appréciation hédonique.

Les données obtenues permettront de refaire l'analyse des correspondances précédente avec les arômes trouvés par les dégustateurs. L'essai comporte plusieurs cépages Bordelais, il sera donc possible de situer les cépages « importés » par rapport aux cépages « autochtones », sur le plan sensoriel.

L'ajout d'une question sur la typicité permet d'une part de tester le jury (Est-ce que les cépages traditionnels du Bordelais sont jugés plus typiques que les autres ?), et d'autre part de tester effectivement si les vins de cépages importés parviennent à exprimer une typicité, ou s'en approchent.

Une analyse des correspondances multiples (ACM) incluant les trois aspects (arômes, hédonique et typicité) permettra de mettre en évidence les associations préférentielles entre les modalités des variables. On pourra mettre la note hédonique en supplémentaire afin de ne pas orienter l'analyse sur cet aspect qui semble accessoire dans un premier temps.

Conclusion et discussion générale

Comme nous avons pu le voir tout au long de ce rapport, l'essai phénotypage est un dispositif qui génère une grande quantité de données très variées. Pour les 5 (ou 10) répétitions de chacun des cinquante-deux cépages étudiés, de nombreuses variables sont mesurées. Au cours de ce stage, nous poursuivions deux objectifs principaux : mettre en place le protocole de traitement des données sur l'essai, et initier la calibration de l'analyseur IRTF.

Traitement des données

Nous avons ainsi pu étudier la phénologie des cépages, du débourrement à la véraison, et tenter de les classer, du plus précoce au plus tardif. L'obtention d'une date de mi-stade pour chaque individu nécessite plusieurs relevés successifs sur le terrain, et une gestion des données rapide. Des scripts R ont donc été développés et permettent la prise en charge et le traitement des relevés. Ils pourront être utilisés en routine et participer à la conception d'une base de donnée de phénologie très riche. En effet, ces résultats seront intégrés à une base de données INRA (VitPhe) pour être utilisés dans l'ajustement de modèles agro-climatiques à plus grande échelle.

Ensuite, nous avons suivi la maturation des fruits, étape essentielle pour la production de raisin à vinifier. Nous avons ainsi pu ajuster un modèle non linéaire à la concentration en sucre dans les moûts en fonction du temps. Les paramètres ajustés par le modèle (taux de sucre au plateau, date de « mi-maturité », et vitesse de maturation) permettent alors de comparer les cépages les uns par rapport aux autres. Concernant ces ajustements de modèles non linéaires, il semble intéressant, si cela est possible, de passer en somme de températures plutôt qu'en jour julien. En effet, la maturation est une étape particulièrement sensible à la température, et cela permettrait de comparer le comportement des cépages à travers différents millésimes.

De plus, bien que nous n'ayons pas eu le temps nécessaire pour le réaliser, il serait intéressant de poursuivre dans cette voie et de tenter de modéliser les cinétiques d'autres variables que les sucres à l'aide de ce type d'équation non linéaire, et d'appliquer la même démarche de caractérisation des cépages. Concernant par exemple l'acidité titrable, un autre paramètre important de la maturation, une courbe de type exponentielle décroissante paraît envisageable (cf. Annexe 2).

Nous ensuite enfin tenté, par une analyse exploratoire, d'évaluer les différences entre les cépages en terme de solutés contenus dans les moûts à maturité/surmaturité. Cette approche a mis en évidence les écarts d'un cépage à l'autre pour des paramètres essentiels au vinificateur comme le taux de sucres ou l'indice de polyphénols totaux. Nous avons utilisé des tests de comparaisons multiples afin de chiffrer ces écarts.

Finalement, compte tenu de la pérennité du dispositif phénotypage, nous nous sommes interrogés sur les méthodes adéquates pour traiter les données de façon synthétique. Parmi celles-ci, nous n'avons pas cité le passage systématique en somme de températures, qui à l'image des modèles phénologiques, permet de s'affranchir des variations de température annuelles et des évènements climatiques ponctuels.

Calibration de l'analyseur

D'autre part, étant donné qu'un grand nombre de variables mesurées dans les moûts proviennent d'un analyseur IRTF, nous nous sommes intéressés à la fiabilité de ces données à travers un essai de calibration qui pourra être poursuivi au fur et à mesure des campagnes. La calibration « commerciale », livrée avec l'appareil, est assez satisfaisante mais a pu être surpassée en terme d'écart-type de précision pour la plupart des variables étudiées. Cette recalibration, qui utilise la méthode PLS sur les données obtenues en 2011, doit évidemment être entretenue et étendue à une base de données plus large (deux à trois ans minimum) afin d'en garantir la performance. Une grande attention doit par ailleurs être portée à la qualité des mesures de référence, puisque l'erreur de l'analyseur sera toujours supérieure ou égale à l'erreur de la mesure. Il faut notamment s'assurer que les traitements subis par les moûts entre le passage dans l'analyseur et la mesure de référence (congélation/décongélation) n'en modifient pas le résultat.

Enfin, nous avons tenté, après avoir « cartographié » les arômes des cépages de l'essai, de suggérer une méthode pour l'analyse sensorielle de vins qui seront fabriqués à partir de raisin des différents cépages du dispositif, afin de les caractériser après micro vinification.

Une fois encore, il est évident que c'est une analyse des données accumulées au fur et à mesure des années qui se révélera véritablement informative quant aux qualités et aux défauts des cépages implantés sur la parcelle. Il est donc nécessaire de maintenir des fichiers les plus synthétiques possible, afin d'être capable de mettre en regard les différents aspects de l'étude. Dans ce cadre, les traitements statistiques ont été réalisés avec le logiciel R, et des scripts sont disponibles pour être réutilisés d'une année sur l'autre.

BIBLIOGRAPHIE ET REFERENCES

Ouvrages

Bertrand D. & Dufour E., (2006), *La spectroscopie infrarouge et ses applications analytiques*, Ed. Tec&Doc

Brisson N. et al., (2010), *Livre vert du projet Climator*, ADEME

Keller M., (2010), *The Science of Grapevines: Anatomy and Physiology*

Publications

Vigne et réchauffement climatique

Bellia, S., Douguédroit, A., and Seguin, B. (2007). Impact du réchauffement sur les étapes phénologiques du développement du Grenache et de la Syrah dans les Côtes du Rhône et les Côtes de Provence (1976-2000). In Actes Du Colloque Réchauffement Climatique, Quels Impacts Probables Sur Les Vignobles

Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., Davidson, O., Hare, W., Huq, S., Karoly, D., Kattsov, V., et al. (2007). Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pachauri RK, Reisinger A (Eds). IPCC, Geneva, Switzerland 104.

Caffarra, A., and Eccel, E. (2009). Increasing the robustness of phenological models for *Vitis vinifera* cv. Chardonnay. *International Journal of Biometeorology* 54, 255–267.

Chuine, I., Kramer, K. and Hänninen, H. (2003) Plant development models. In: Phenology: an integrative environmental science, 1st edn. Ed. M.D. Schwartz (Kluwer Press: Milwaukee, WI) pp. 217–235.

García de Cortázar-Atauri, I. (2006) Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France, Doctorat, modélisation agro-climatique.

García de Cortázar-Atauri, I., Brisson, N., and Gaudillere, J.P. (2009). Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *International Journal of Biometeorology* 53, 317–326.

Jones, Gregory V., Michael A. White, Owen R. Cooper, et Karl Storchmann. (2005) « Climate Change and Global Wine Quality ». *Climatic Change* 73, n° 3, 319–343.

Jones, G.V. (2007). Climate change: observations, projections, and general implications for viticulture and wine production, XII Congresso Brasileiro de Viticultura e Enologia, 55-66

Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., et al. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12, 1969–1976.

Parker A.K., de Cortázar-Atauri I.G., van Leeuwen C. and 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, 206–216.

Richardson EA, Seeley SD, Walker DR (1974) A model for estimating the completion of rest for Redhaven and Elberta peach trees. HortScience 9(4):331–332.

Van Leeuwen, C., Bois, B., Cellié, N., Trégoat, O., and Roby, J.P. (2009) Les modifications de l'expression du terroir induites par le changement climatique nécessitent une adaptation du matériel végétal et des techniques viticoles. Revue française d'œnologie 235, 10-14.

Webb LB, Whetton PH, Barlow EWR (2008) Climate change and winegrape quality in Australia. Clim Res 36:99-111.

Régression PLS

Mevik, B.H., and Wehrens, R. (2007). The pls package: Principal component and partial least squares regression in R. Journal of Statistical Software 18, 1–24.

Tobias, R.D., and others (1995). An introduction to partial least squares regression. In Proc. Ann. SAS Users Group Int. Conf., 20th, Orlando, FL, pp. 2–5.

Sensométrie

Symoneaux, R. et al., (2010) La typicité sensorielle des vins d'appellation : comment la mesurer avec les professionnels, comment l'aborder avec les consommateurs ?, Revue française d'œnologie 242, 94-101.

Sites Internet (au 20/08/2012)

Modèles phénologiques

Landais, (2007),

https://www.supagro.fr/pollen/index.php?option=com_content&task=view&id=59&Itemid=203

Deloire (2008),

<http://www.vignevin-sudouest.com/publications/fiches-pratiques/maturite-raisins-rouges.php>

Résistivité d'un sol

INRA,

http://www.inra.fr/les_partenariats/collaborations_et_partenaires/entreprises/en_direct_des_labos/resistivite_electrique_des_sols

Test de comparaisons multiples

Appendix: Tables - Fundamentals of Exploratory Analysis of Variance - Wiley Online Library.

EI Methni M. (2005), <http://domus.grenet.fr/grimass/MathSHS/PSY3/ANOVA/Cours/Chap8.htm>

Caractérisation aromatique des cépages

<http://www.vindefrance-cepages.org/fr/encyclopedie-des-cepages-de-france>

<http://plantgrape.plantnet-project.org/>
<http://lescepages.free.fr/cepmmc.html>
<http://www.twis.info/grapes.php?action=setLanguage&LANGUAGE=fr&>
<http://www1.montpellier.inra.fr/vassal/ressources/fichesvarietales.php>
http://www.winepros.org/wine101/grape_profiles/varietals.htm
<http://technorestor.org/oenologie/cepages/cepage.pdf>

Analyse sensorielle du vin

Levassort,

<http://s3.e-monsite.com/2011/01/03/26473640analyse-sensorielle-des-vins-fiche-degustation-pdf.pdf>

ANNEXES

	Cépages blancs (17)	Origine	Provenance	Clone
1	Alvarinho	Espagne	-	-
2	Asyrtiko	Grèce	VASSAL	NC
3	Chardonnay	France	INRA BX	95
4	Chasselas (réf précoce')	France	INRA BX	887
5	Chenin blanc	France	ENTAV	1018
6	Colombard	France	CA 33	605
7	Liliorila (Baroque * Chardonnay)	France	INRA BX	734
8	Muscadelle	France	CA 33	610
9	Petit Manseng	France	CA 64	573
10	Petite Arvine	Suisse	INRA BX	NC
11	Riesling	France	INRA BX	49
12	Roussanne	France	ENTAV	468
13	Rkatsiteli	Géorgie	INRA BX	NC
14	Sauvignon blanc	France	CA 33	108
15	Sémillon	France	CA 33	908
16	Ugni blanc	France	CA 33	384
17	Viognier	France	ENTAV	1051

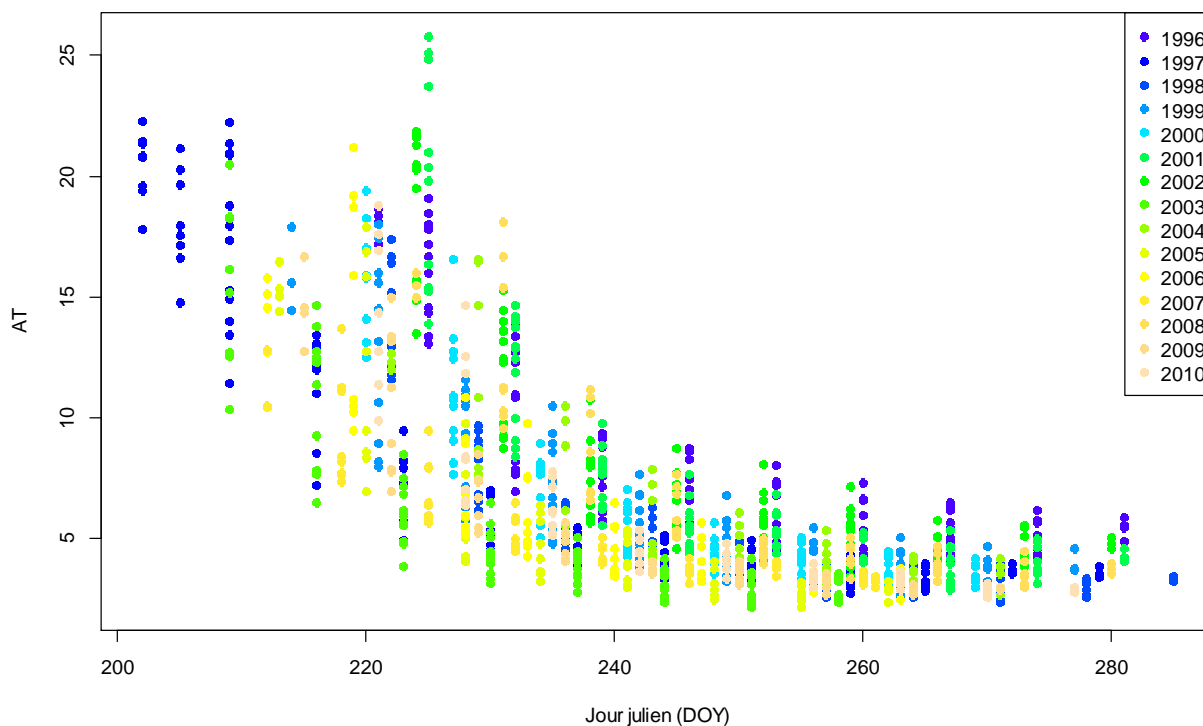
	Cépages rouges (30)	Origine	Provenance	Clone
1	Agiorgitiko	Grèce	-	-
2	Arinarnoa	France	INRA BX	723
3	Cabernet franc	France	CA 33	327
4	Cabernet Sauvignon	France	CA 33	412
5	Carignan	France	ENTAV	65
6	Carmenère	France	CA 33	1059
7	Castets	France	INRA Bx	CC
8	Cornalin	Suisse	INRA Bx	NC
9	Cot	France	CA 33	1061
10	Gamay (réf précoce')	France	ENTAV	358
11	Grenache	France	ENTAV	513
12	Marselan	France	ENTAV	980
13	Mavrud	Bulgarie	-	-
14	Merlot	France	CA 33	347
15	Morrastel (Graciano)	France	ENTAV	949
16	Mourvèdre	France	ENTAV	369
17	Nero d'Avola (Calabrese)	Italie	-	-
18	Petit Verdot	France	CA 33	1058
19	Pinot noir	France	ENTAV	667
20	Prunelard	France	Gaillac	CC
21	Sangiovese (Niellucio)	Italie	ENTAV	903
22	Saperavi	Géorgie	INRA BX	NC
23	Syrah	France	CA 11	470
24	Tannat	France	CA 64	474
25	Tempranillo	Espagne	ENTAV	771 ou 770
26	Tinto Cao	Portugal	VASSAL	CC
27	Touriga Francesa	Portugal	VASSAL	NC
28	Touriga Nacional	Portugal	INRA Bx	NC
29	Vinhao (Souzao)	Portugal	-	-
30	Xinomavro	Grèce	-	-

	Cépages hybrides (5)	Obtention	Clone
1	BX 9216 Blanc	INRA Bordeaux	NC
2	BX 648 Rouge	INRA Bordeaux	NC
3	Hibernal Blanc	Geisenheim - Allemagne	NC
4	MPT 3156-26-1 Blanc	INRA Montpellier	NC
5	MPT 3160-12-3 Rouge	INRA Montpellier	NC

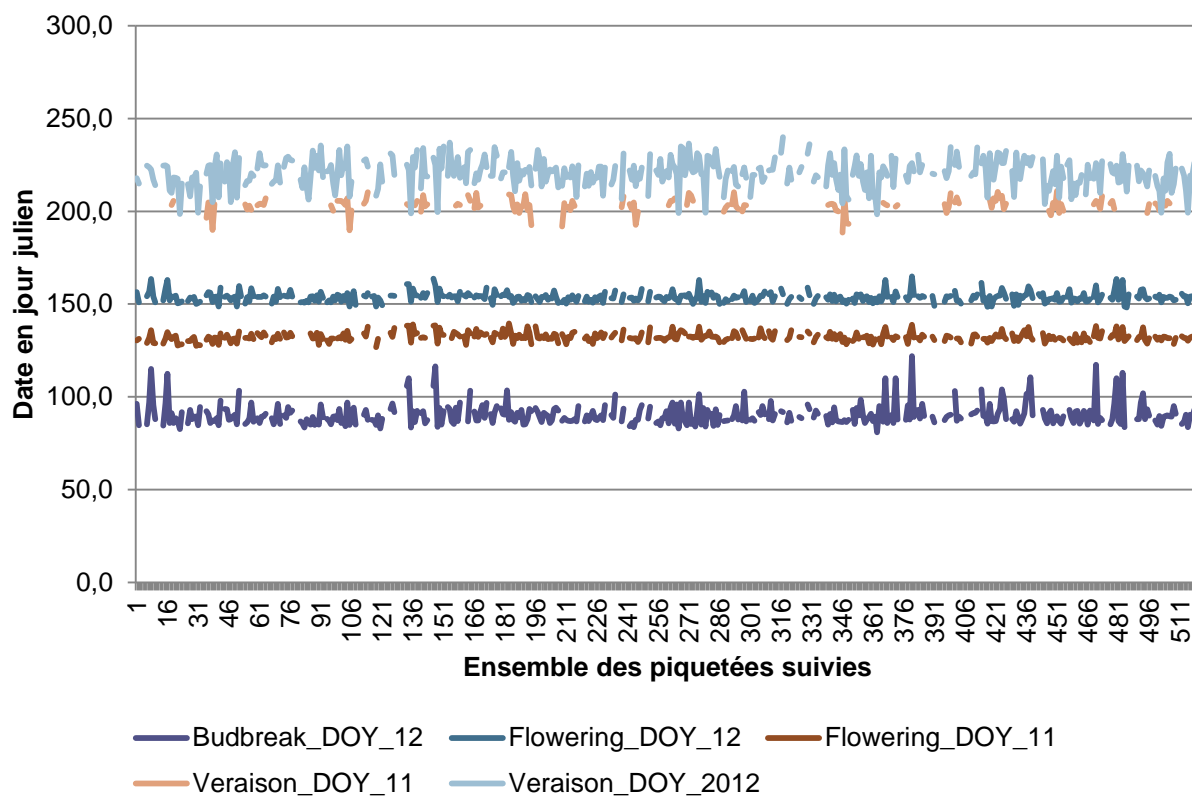
NC : pas de clone répertorié ; CC : clone de collection

Annexe 1 : Clone, origine et provenance des cépages implantés sur la parcelle phénotypage

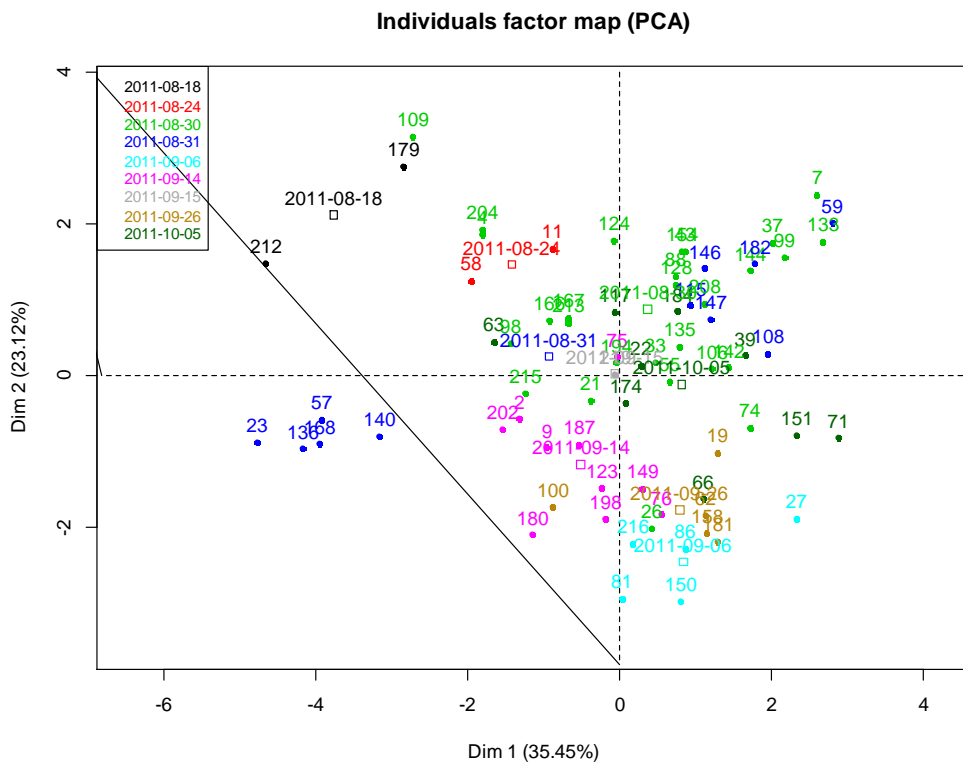
Acidité titrable dans les moûts issus des parcelles Cheval Blanc sur 3 types de sol entre 1996 et 2010



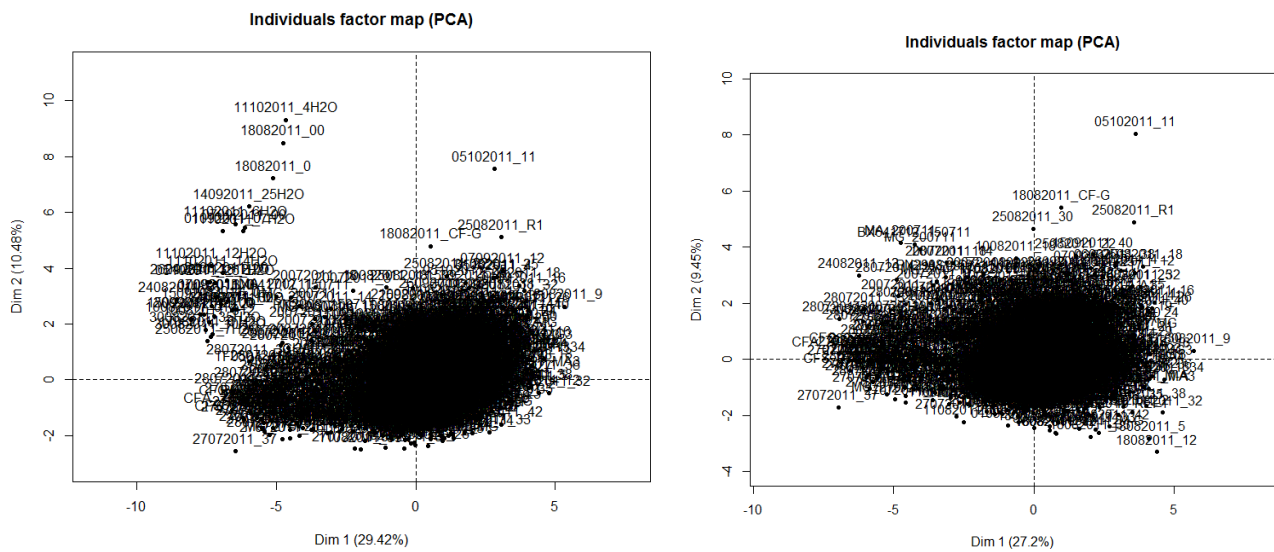
Annexe 2 : Représentation de la dynamique de l'AT dans les baies de trois cépages sur 15 ans dans une propriété viticole du Bordelais



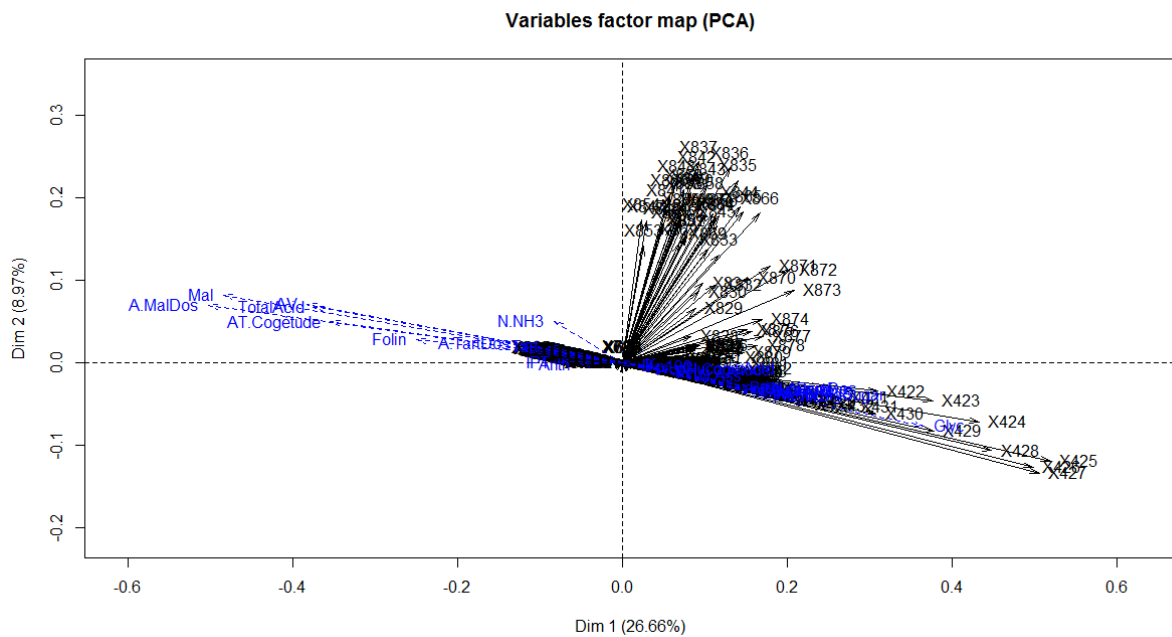
Annexe 3 : Représentation des dates de mi-débourrement, mi-floraison et mi-véraison sur l'essai phénotypage en 2011 et 2012



Annexe 4 : Graphe des individus de l'ACP réalisée sur les variables d'analyse derniers relevés 2011 pour les cépages blancs (code couleur par date de prélèvement)



Annexe 5 : Graphe des individus de l'ACP réalisée sur les données spectrales de 2011 avec (à gauche) et sans (à droite) les spectres issus d'échantillons d'eau



Annexe 6 : Graphe des variables de l'ACP réalisée sur les données spectrales des échantillons 2011, avec en supplémentaires (bleu) les variables dosages

✓→ Dans la majorité des cas, les tableaux de données attendus en entrée des scripts doivent être au format .txt, séparateur de colonne tabulation («\t»). Mieux vaut respecter ce format. En cas de besoin il est toutefois possible de changer ces paramètres dans la fonction d'import `read.table()`, généralement située au début du script (voir l'aide de la fonction en tapant `?read.table` dans la console).

caractéristique fichier	nom de colonne en première ligne	séparateur colonnes	séparateur décimales	type de colonne
paramètre correspondant <code>read.table()</code>	<code>header=TRUE</code> ou <code>FALSE</code>	<code>sep="\t", "</code> ou <code>;"</code>	<code>dec=", "</code>	<code>colClasses="character", "numeric", "factor"...</code>


MISE-A-JOUR DU FICHIER DE RELEVÉ

Le tableau récapitulatif des relevés doit être mis à jour à chaque dévidage. Il consiste en 4+X colonnes, l'identifiant, un 0, le nombre initial, le nombre à atteindre, et le nombre atteint à chaque date de relevé (nom de colonne X150 pour le relevé du jour 150).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	id	releve	Pini	Patt	X144	X146	X150	X152	X156	X158	X158			
2	0010110210010	0	0	50	0	0	0	10	35	95	95			
3	0010206200020	0	0	50	0	0	30	75	NA	NA	NA			
4	0010331200030	0	0	50	0	0	0	0	0	NA	0			
5	0010408210040	0	0	50	0	0	0	10	65	NA	NA			
6	0010501200050	0	0	50	0	0	0	0	0	NA	0			
7	0010633200060	0	0	50	0	0	2	25	70	NA	NA			
8	0010711210070	0	0	50	0	0	0	0	40	75	75			
9	0010826210080	0	0	50	0	0	0	0	1	15	15			
10	0020110210010	0	0	50	0	0	0	10	90	NA	NA			

La mise à jour se fait à l'aide du script `120308_match&split.R` qui prend en entrée la mise à jour précédente, ainsi que le dernier relevé, en précisant les numéros de colonne à prendre en compte. Attention à bien regrouper les données issues des deux terminaux dans un même fichier (une seule colonne par jour de relevé) avant d'effectuer la mise à jour. Le script ajoute ensuite simplement une colonne au tableau en faisant matcher les colonnes identifiant. La commande `write.table()` permet ensuite d'enregistrer le tableau mis à jour à l'adresse souhaitée.

CREATION DE LA NOUVELLE BASE

	Diplôme : Ingénieur Agronome Spécialité : Statistique appliquée Spécialisation / option : Enseignant référent : Julie Josse
Auteur(s) : L. Durand Date de naissance* : 28/01/1989	Organisme d'accueil : ISVV UMR EGFV Adresse : 210, chemin de Leysotte
Nb pages : 70 Annexe(s) : 1	33140 Villenave d'Ornon
Année de soutenance : 2012	Maître de stage : Cornelis van Leeuwen
Titre français : Mise en place d'un protocole de traitement de données pour l'étude de l'adaptation d'une large gamme de cépages aux évolutions climatiques en bordelais Titre anglais : Study of the adaptation of a wide range of varieties to climate change in the Bordeaux area: protocol for data processing	
Résumé (1600 caractères maximum) : Dans l'éventualité d'une modification de l'encépagement dans le Bordelais, en lien avec les changements climatiques actuels et futurs, un dispositif expérimental a été implanté afin d'étudier le comportement et l'adaptation d'un grand nombre de cépages français et étrangers. Cette étude, qui consiste à phénotyper les variétés génère différents types de données qui nécessitent des traitements spécifiques. Dans ce travail, nous avons pu établir un protocole de traitement des données répétable annuellement grâce à des scripts (langage R). Pour les notations de phénologie, ils permettent d'obtenir les dates ou sommes de températures de mi-débourrement, mi-floraison et mi-véraison. Pour les suivis de maturation, les paramètres d'un modèle non linéaire ont été ajustés aux cinétiques d'accumulation des sucres afin de caractériser les cépages. Une ACP a été mise en œuvre pour explorer la variabilité de la composition des baies à maturité. De plus, la calibration d'un analyseur IRTF a pu être initiée à l'aide des valeurs d'analyses de références effectuées au laboratoire. Ce travail intervient au début du projet (la parcelle est en production depuis 2011) et pose un cadre et des recommandations pour le traitement des données à venir.	
Abstract (1600 caractères maximum) : In relation to the current and future climatic change, possible grapevine variety modifications are being considered in the Bordeaux area. In order to anticipate these modifications, an experiment has been put in place to study the behaviour and adaptation of a wide range of varieties (both French and foreign) to the Bordeaux climatic context. This study generates many data sets that require specific treatment. In this work, a protocol for data management has been established, which will be re-used each year (R scripts). It provides user usable databases from field measurements. As such day of year or sum of temperatures can be obtained, from the phenological data, for the three critical observation stages: bud break, flowering and véraison. The dynamic of sugar ripening of each variety can also be characterised by adjusting the parameters of a nonlinear model to the data. A factorial analysis, also implemented, allows us to identify the main dimensions of variability between the different varieties berry composition after ripeness. Furthermore, the calibration of an Infrared analyzer was initiated with the matching reference measurements values. Finally, this work is placed at the beginning of a long-term study (the plot has only produced grapes since 2011) and as such attempts to structure and anticipate the data processing to come.	
Mots-clés : vigne, changement climatique, phénologie, phénotypage, maturation, cépages	

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires

Document à déposer dans l'espace moodle