



HAL
open science

Étude de la maturation du Chardonnay blanc et de son implication dans la construction du potentiel de longévité des vins blancs de Bourgogne

Laure Cibien

► **To cite this version:**

Laure Cibien. Étude de la maturation du Chardonnay blanc et de son implication dans la construction du potentiel de longévité des vins blancs de Bourgogne. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04827741

HAL Id: dumas-04827741

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04827741v1>

Submitted on 9 Dec 2024

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

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

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du Master Vigne et Vin
Option Viticulture – Œnologie

Etude de la maturation du Chardonnay blanc et de son implication dans la construction du potentiel de longévité des vins blancs de Bourgogne.



par Laure CIBIEN

Année de soutenance : 2024

Organisme d'accueil : Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**Présenté pour l'obtention du Master Vigne et Vin
Option Viticulture – Œnologie**

***Etude de la maturation du Chardonnay blanc et de son
implication dans la construction du potentiel de longévité des
vins blancs de Bourgogne.***



par Laure CIBIEN

Année de soutenance : 2024

Organisme d'accueil : Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne

**Maître de stage : Domitille Brosseau
Tuteur pédagogique : Aurélie Roland**

C'est l'oxygène qui fait le vin, c'est par son influence qu'il vieillit.

Pasteur, 1873

RESUME

La Bourgogne, connue pour ses vins blancs de garde issus du Chardonnay, fait face depuis plusieurs années à des problématiques de vieillissement atypiques de ces vins, avec l'apparition de défauts d'oxydations. En réponse à cela, le BIVB a lancé un programme sur la longévité des vins blancs afin d'identifier les facteurs impliqués dans la construction du potentiel de garde et ainsi aider les vignerons à mieux maîtriser leurs pratiques.

Durant de ce projet, l'utilisation de l'outil Polyscan a permis de suivre les composés oxydables lors du pressurage, du débouillage et de l'élevage à l'aide de plusieurs indices. Des corrélations entre la maturité des baies, les cinétiques d'extractions des composés phénoliques et les niveaux de résistances des vins à l'oxydation ont alors pu être établies.

En 2024, une nouvelle étude a été menée sur la maturité afin d'approfondir les connaissances sur les dynamiques de maturation et leurs impacts sur la qualité des vins. Ainsi, 40 parcelles ont été suivies à l'aide de l'indice MaturOx. Les résultats ont montré que le minimum de MaturOx, point clé durant la maturation, varie en fonction de plusieurs facteurs géographiques et de la composition des baies de raisins. De plus, un suivi dans les temps des parcelles d'études permettra d'établir des liens entre les cinétiques de maturation, le minimum de MaturOx et la capacité de résistance des vins vis-à-vis de l'oxydation. Ainsi, l'utilisation de l'indice MaturOx pourrait s'avérer complémentaire aux indicateurs traditionnels de la maturité et aiderait les vignerons à affiner leurs prises de décisions au moment de la récolte afin de limiter les risques d'apparition de défauts oxydatifs.

Mots-clés : maturité – MaturOx – Chardonnay – composés phénoliques - longévité – oxydation

ABSTRACT

Title: Study of the maturation of Chardonnay Blanc and its impacts on longevity and aging potential of white Burgundy wines.

Burgundy, known for its aging wines has been facing problems of random oxidation of white wines made from Chardonnay Blanc. Burgundy Wines Board (BIVB) launched a research and experimentation program in order to understand the longevity and aging potential construction. During this project, measurement of different index, thanks to the Polyscan tool, have allowed to analyze oxidizable compounds during pressing, settling, bottling and aging. Then, correlations between kinetics extractions of phenolic compounds and resistance of wines to oxidation during aging have been made.

In 2024, a new study was carried out on maturity in order to deepen knowledge on maturation dynamics and their impacts on wine longevity and quality. For this, 40 plots have been monitoring with a new index: the MaturOx. Then, links between maturation kinetics and minimum of MaturOx have been showed. The results reveal that the minimum of MaturOx varies depend on different factors such as grape berries composition, geographical areas, soil type... MaturOx index appears as complementary to traditional indicators of maturity and would help winemaker to refine their decision-making at harvest time.

Monitoring wines from these plots at different stages of winemaking will permit to link grapes maturity data to settling and aging data. Then, its impacts on longevity and resistance capacity of white wines to oxidation will be identified.

Keywords: maturity – MaturOx – Chardonnay – phenolic compounds – longevity – oxidation

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier les personnes suivantes, pour l'expérience enrichissante qu'elles m'ont fait vivre.

Je tiens à remercier Domitille, pour son accueil et son accompagnement, ainsi que toute l'équipe du CITVB, Jean-Philippe, Nadia, Marion Z, Léa F, Léa P, Camille B, Julie, Christine, Marion W et Thomas pour les riches échanges le midi et pour toutes les anecdotes racontées.

Un grand merci à mes deux coloc du « bureau des stagiaires », Laurine et Camille, d'avoir égayé mes journées et pour les moments de partages.

Merci aussi aux membres de l'IFV, pour leur bienveillance et leurs apports techniques lors des dégustations.

Merci à Christine et Emmanuel de Vinventions, pour leur disponibilité.

J'aimerais également remercier l'ensemble des viticulteurs, vigneron et négociants du réseau VOLTA qui ont pris le temps de me recevoir et d'échanger malgré des emplois du temps chargés.

Merci à chacun d'entre eux pour m'avoir transmis leur passion, m'avoir fait découvrir la Bourgogne et presque oublier la pluie..!

Enfin, j'aimerais remercier mes proches, ma famille et mes amis, qui, de près ou de loin, ont partagé cette aventure avec moi.

Un grand merci à la team des VO bourguignons, Baptiste, Cédric, Théophile, Mika, Louise, Thomas et Olivier, pour les dégustations, visites, restos et soirées passées ensemble.

Une pensée à Aziz et à la team crossfit pour leur bonne humeur et les petits WOD musclés dès 7h30 !

Merci à ceux qui sont venus me rendre visite à Beaune (ou plutôt Bône, comme y disent) et qui ont ramené un petit bout du Sud avec eux pour réchauffer mon cœur.

Merci à Emilie d'avoir fait de moi une apprentie Jedi de R et pour son aide à toute heure.

Merci à ma sœur, Clem, d'avoir sauvé la rédaction de ce mémoire...

Merci à ma loutre, pour son soutien constant et inconditionnel.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les chiffres clés de la Bourgogne viticole.	20
Figure 2 : Organisation générale et fonctionnement du BIVB.....	22
Figure 3 : Éléments constituant le potentiel de longévité.....	24
Figure 4 : Processus de dissolution (a) et consommation (b) de l'oxygène au contact du vin.....	26
Figure 5 : Répartition des composés phénoliques de la baie.	26
Figure 6 : Schéma simplifié des mécanismes d'oxydation des vins blancs.	28
Figure 7 : Mécanismes d'oxydation enzymatiques aboutissant à la formation d'o-quinone à partir d'un monophénol, en présence d'oxygène.....	30
Figure 8 : Mécanismes d'oxydation chimiques aboutissant à la formation d'o-quinone et de radicaux libres réactifs, en présence d'oxygène et d'ions métalliques.	30
Figure 9 : Principaux mécanismes réactionnels impliquant les o-quinones.	30
Figure 10 : Cascades de réactions aboutissant à la formation de pigments colorés.....	32
Figure 11 : Mécanismes réactionnels aboutissant aux modifications organoleptiques.	32
Figure 12 : Les pratiques œnologiques impliquées dans la construction du potentiel de vieillissement du vin.....	34
Figure 13 : Mécanismes d'actions du dioxyde de soufre.....	36
Figure 14 : Rôle de l'acide ascorbique et du glutathion dans les réactions d'oxydation.....	36
Figure 15 : Étapes de maturation des baies et représentation de l'évolution de certains composés.	38
Figure 16 : Schématisation des mécanismes intracellulaires de la maturation de la baie.....	38
Figure 17 : Exemple de voltamogramme obtenu à l'aide du PolyScan, et représentation des indices EasyOx et PhenOx.	44
Figure 18 : Représentation de l'évolution du chargement en sucre de la baie, de l'évolution de l'indice MaturOx au cours du temps et des séquences aromatiques hypothétiques associées.	46
Figure 19 : Indices mesurés à l'aide du Polyscan aux différentes étapes de l'itinéraire technique... ..	48
Figure 20 : Répartition géographique des 40 parcelles d'études.	48
Figure 21 : Exemple de sélection des rangs au sein d'une parcelle.	48
Figure 22: Indice PhenOx au début du pressurage en fonction des groupes de TAVP (%vol.)	56
Figure 23 : Evolution de l'indice PhenOx au cours du pressurage en fonction des groupes de TAVP (%vol.)	56
Figure 24 : Indice PhenOx au début du pressurage en fonction du TAVP (%vol.) et du millésime. .	56
Figure 25 : Evolution de l'indice PhenOx au cours du pressurage en fonction du TAVP (%vol.) et du millésime.....	56
Figure 26 : Indice PhenOx au début du pressurage en fonction de l'acidité totale (gH ₂ SO ₄ /L).	58
Figure 27 : Evolution de l'indice PhenOx au cours du pressurage en fonction des groupes d'acidité totale (gH ₂ SO ₄ /L).	58
Figure 28 : Indice PhenOx au début du pressurage en fonction de l'acidité totale (gH ₂ SO ₄ /L) et du millésime.....	58
Figure 29 : Evolution de l'indice PhenOx au début du pressurage en fonction de l'acidité totale (gH ₂ SO ₄ /L) et du millésime.	58
Figure 30 : Indice PhenOx au début du pressurage en fonction des groupes de ratios S/A.	60
Figure 31 : Evolution de l'indice PhenOx au cours du pressurage en fonction des groupes de ratios S/A.....	60
Figure 32 : Indice PhenOx au début du pressurage en fonction du ratio S/A et du millésime.	60
Figure 33 : Evolution de l'indice PhenOx au début du pressurage en fonction du ratio S/A et du millésime.....	60

Figure 34 : PhenOx en cuve de débouillage en fonction des groupes de TAVP (%vol.).....	62
Figure 35 : PhenOx en cuve de débouillage en fonction des groupes d'AT (gH ₂ SO ₄ /L).....	62
Figure 36 : PhenOx en cuve de débouillage en fonction des ratios S/A.....	62
Figure 37 : Indice MaturOx en fonction du temps et de l'opérateur.	64
Figure 38 : Indice MaturOx en fonction des opérateurs.....	64
Figure 39 : Indice MaturOx en fonction du temps d'attente entre le foulage et l'analyse au Polyscan.	64
Figure 40 : Indice MaturOx en fonction des temps d'attente entre le foulage et l'analyse au Polyscan.....	64
Figure 41 : Evolution du MaturOx au cours de la maturation et identification du minimum.	66
Figure 42 : Contribution des variables aux dimensions 1 et 2 de la FAMD.....	66
Figure 43 : Visualisation des dates de minimum de MaturOx par secteur.	68
Figure 44 : Poids de 200 baies en fonction des secteurs au moment du minimum de MaturOx.	68
Figure 45 : Concentration en sucre en fonction des secteurs au moment du minimum de MaturOx.	68
Figure 46 : TAVP (%vol.) en fonction des Secteurs au moment du minimum de MaturOx.	70
Figure 47 : AT en fonction des secteurs au moment du minimum de MaturOx.	70
Figure 48 : Acide malique (g/L) en fonction des secteurs au moment du minimum de MaturOx.....	70
Figure 49 : Rapport S/A en fonction des secteurs au moment du minimum de MaturOx.....	72
Figure 50 : Représentation multi-millésimes des PhenOx en cuve de débouillage.	78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Teneurs en composés phénoliques des vins blancs.....	26
Tableau 2 : Les principaux non-flavonoïdes et leurs structures chimiques.	28
Tableau 3 : Les principaux flavonoïdes et leurs structures chimiques.	28
Tableau 4 : Principales molécules antioxydantes utilisées en vinification.....	34
Tableau 5 : Principaux gaz inertes utilisés en œnologie.	36
Tableau 6 : Principaux paramètres suivis lors de la maturation de la baie de raisin.	40
Tableau 7 : Exemples de méthodes d'évaluations des paramètres de la maturité.....	42
Tableau 8 : Informations des parcelles d'études sélectionnées.....	50
Tableau 9 : Exemple des données de suivies pour une parcelle d'étude.	66
Tableau 10 : Moyenne des paramètres de la maturité au moment du minimum de MaturOx et moyennes des évolutions par semaine avant et après cette date.	74
Tableau 11 : Méthodes d'analyses de la capacité oxydative et antioxydante d'une matrice vin.....	1

TABLE DES MATIERES

Résumé	7
Abstract	9
Remerciements.....	11
Liste des figures.....	13
Liste des tableaux.....	15
Table des matières	17
Liste des abréviations	19
Introduction.....	21
Structure d'accueil	23
I. Etat de l'art	25
A. Les défauts d'oxydation.....	25
1. Les molécules responsables de l'oxydation	25
a) L'oxygène.....	25
b) Les composés phénoliques	27
(1) Les non-flavonoïdes.....	27
(2) Les flavonoïdes.....	29
(3) Composés phénoliques issus du bois	29
2. Principes et mécanismes de l'oxydation	29
a) L'oxydation enzymatique.....	29
b) Les réactions d'oxydations chimiques et l'importance des cofacteurs	31
c) Les composés d'oxydation et leurs impacts dans le moût et le vin	31
(1) Le brunissement du moût et du vin	31
(2) L'apparition d'arômes oxydatifs.....	33
3. Les méthodes d'évaluation	33
B. L'importance des pratiques œnologiques.....	35
C. La maturité, un élément de réponse vers la compréhension de la longévité ?.....	37
1. La maturation des baies	39
2. Les paramètres importants à suivre lors de la maturation du raisin.....	39
3. La maturité et son impact sur la composition du moût et du vin	43
4. Les méthodes d'évaluation des paramètres de la maturité	45
D. Nouvel outil de mesure : développement et validation de la méthode	45
1. Le Nomasens PolyScan	45
a) Développement et principe de l'appareil.....	45
b) Les indices mesurés	45
2. Validation interne de la méthode.....	47

II. Matériels et méthodes	49
A. Mise en place et animation d'un réseau partenaire	49
B. Prises d'échantillons et réalisation des mesures à l'aide du Polyscan	49
1. En cave : aux différentes étapes de la vinification.....	49
a) Mesure du PhenOx et EasyOx lors du pressurage.....	49
b) Mesure du PhenOx et EasyOx à la fin du débouillage.....	49
c) Mesure du TE à la fin de la fermentation alcoolique (FFA)	49
2. À la parcelle : contrôle maturité	51
a) Sélection des parcelles d'études	51
b) Collecte et analyse des échantillons.....	51
C. Réalisation d'analyses complémentaires.....	51
1. Analyse de suivi maturité au laboratoire d'analyse	51
2. Analyses de marqueurs moléculaires	51
D. Cas des sites « autonomes »	53
E. Traitement des données : analyses statistiques	53
F. Conception du protocole expérimental pour validation de la méthode	53
III. Résultats et discussion.....	55
A. Exploitation des données acquises en 2020 et 2021	55
1. Etude des paramètres de la maturité sur les catégories de pressoir	55
2. Etude des paramètres de la maturité sur les PhenOx obtenus en cuve de débouillage ...	63
B. Présentation des données acquises en 2024	65
1. Validation du protocole expérimental	65
2. Comprendre le millésime	67
3. Caractérisation de la maturité	67
4. Croisement des données avec les mesures aux différents stades de l'itinéraire technique	
79	
Conclusion et perspectives	81
Références bibliographiques.....	83
Annexes	95
A. Annexe 1.....	1
B. Annexe 2.....	5
C. Annexe 3.....	9

LISTE DES ABREVIATIONS

ANOVA : Analyse de la variance

AOC : Appellation d'Origine Contrôlée

Ar : Argon

AT : Acidité totale

BIVB : Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne

COEB : Centre Œnotechnique de Bourgogne

CO₂ : Dioxyde de carbone

ELV : Elevage

FA : Fermentation Alcoolique

FAMD : Analyse Factorielle de Données Mixtes

Fe²⁺ : Ion ferreux

Fe³⁺ : Ion ferrique

FFA : Fin de Fermentation Alcoolique

FID : Détecteur à ionisation de flamme

FML : Fermentation Malo-Lactique

GC : Chromatographie Gazeuse

GC-MS : Chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse

GRP : Grape Reaction Product, acide 2-S-glutathionyl caftarique

GSH : Glutathion

H₂O₂ : Peroxyde d'hydrogène ou eau oxygénée

HO• : Radical libre hydroxyle

HO₂⁻ : Radical hydroperoxyde

HPLC : Chromatographie en phase liquide à haute performance

N₂ : Azote

Nass : Azote assimilable

O₂ : Dioxygène ou oxygène

o-quinone : *ortho*-quinone

OIV : Organisation internationale de la vigne et du vin

PPO : Polyphénols oxydase

S/A : Sucres / Acides

SO₂ : Anhydride sulfureux ou dioxyde de soufre

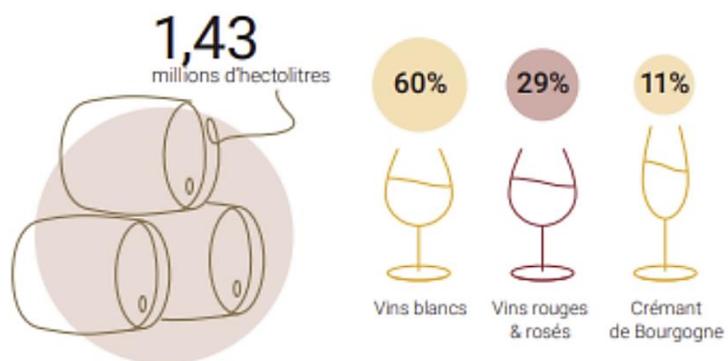
TAVP : Titre Alcoométrique volumique potentiel

TDN : 1,1,6-triméthyl-1,2-dihydronaphtalène

TE : Tendance d'Evolution

YAN : Azote assimilable

La Production moyenne*



Les Cépages

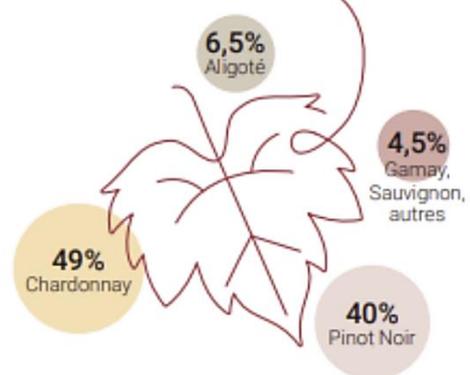


Figure 1 : Les chiffres clés de la Bourgogne viticole.
Source (BIVB, 2022a)

INTRODUCTION

Implanté à l'époque romaine, le vignoble de Bourgogne a été développé par les moines et les Ducs de Bourgogne, puis a évolué malgré les épreuves du XIX^e et XX^e siècle, marqué par la crise du phylloxera, les guerres mondiales, la Prohibition des États-Unis et les crises économiques. Ce n'est qu'à partir du XX^e siècle que le marché des vins bourguignons a retrouvé sa notoriété, notamment grâce à l'adoption des Appellation d'origine contrôlée (AOC) en 1936. Aujourd'hui, le vignoble bourguignon prospère et s'étend sur 28 841 hectares, Figure 1, avec une production moyenne de 1.43 millions de bouteilles de vins, dont 60% de blanc, 29% de rouge et 11% de crémant, commercialisées dans près de 180 pays (chiffres 2022). Les vins sont majoritairement issus des deux cépages emblématiques de la région, le Pinot Noir et le Chardonnay Blanc. Depuis des années, le Chardonnay signe les plus grands vins blancs de garde qui font la renommée de la Bourgogne. Cependant, depuis les années 2010, l'apparition aléatoire de marqueurs du vieillissement atypique, ou défauts d'oxydations, sur ces vins, soulève de nombreuses questions sur la construction du potentiel de garde.

En 2019, suite à une demande de la part des professionnels viticulteurs et négociants de la filière viti-vinicole bourguignonne, le Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne (BIVB) a lancé un programme spécifique sur la thématique de la longévité des vins blancs, en associant des approches techniques et scientifiques. L'objectif principal est d'identifier les éléments impliqués dans la construction du potentiel de vieillissement des vins blancs issus de Chardonnay. Les autres objectifs sont d'apporter des outils à l'attention des vinificateurs pour les aiguiller dans leurs itinéraires techniques mais également de les aider à définir le potentiel de garde de leurs vins pour s'assurer que le consommateur les déguste à leur apogée. En réponse à un appel à projets, l'entreprise Vinventions propose son expertise et son outil, le Nomasens Polyscan, permettant de renseigner sur les composés biochimiques oxydables de la baie de raisin, du moût et du vin. Ainsi, en 2020, le projet VOLTA est lancé. Grâce à un réseau de caves partenaires, différentes observations terrains ont été réalisées à l'aide du Polyscan. En 2020 et 2021, des mesures de composés oxydables ont été réalisées lors d'une étape clé : le pressurage. Ces observations ont permis de distinguer 3 catégories de pressoir en fonction de la cinétique d'extraction des composés phénoliques, de leur quantité et de leur qualité. Afin d'évaluer si l'état de maturité des raisins pressurés définissait systématiquement la classe de pressoir auquel appartenait le moût qui en était issu, des croisements succincts de données ont été réalisés. Les résultats obtenus ont permis de dégager des tendances d'influences entre l'état de maturité et la classe de pressoir. Néanmoins, aucune corrélation franche n'a pu être établie.

Suite à ces observations, une étude de la caractérisation plus fine de la maturation a été demandée par l'ensemble des membres prenant part au projet. L'objectif de cette démarche est d'essayer d'apporter des réponses plus claires sur l'implication de la maturation du raisin dans la construction du potentiel de longévité des vins blancs. Alors, en 2024, un nouvel essai a été mis en place portant sur la maturité. Le but de cette étude est de caractériser plus spécifiquement la maturation, grâce à l'indice MaturOx. Puis de voir si cet indice apporte des informations complémentaires aux analyses utilisées empiriquement. Dans un second temps, les mesures à l'aide du Polyscan se poursuivent aux stades débourbage, fin de fermentation alcoolique et élevage. En parallèle, une approche analytique est utilisée avec notamment la recherche des différents composés et marqueurs moléculaires caractéristiques de l'évolution et des défauts d'oxydation. Les données collectées au niveau de la maturité pourront ainsi être croisées avec celles obtenues aux différentes étapes de l'itinéraire technique.

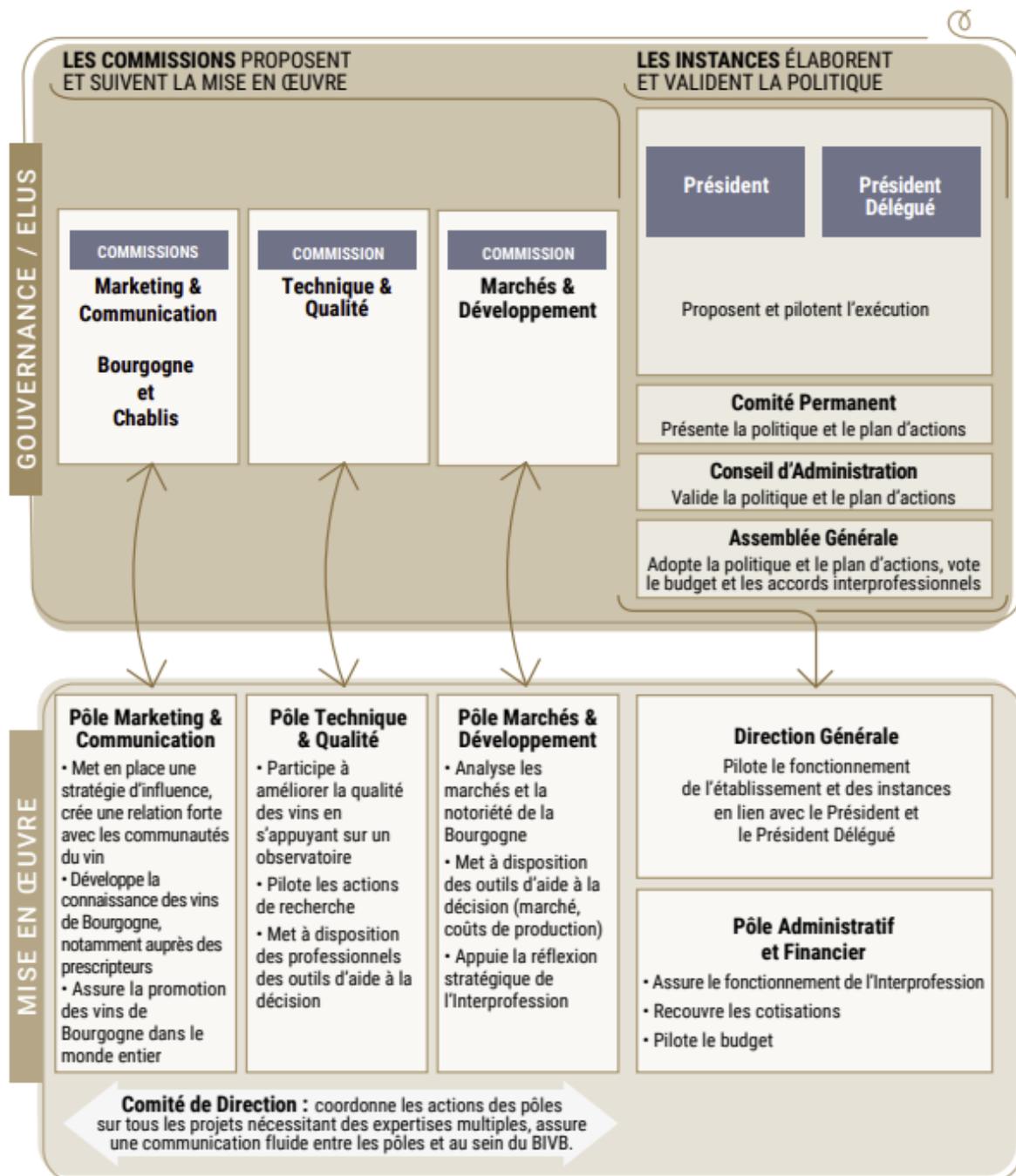


Figure 2 : Organisation générale et fonctionnement du BIVB.
Source : Document interne au BIVB

STRUCTURE D'ACCUEIL

Le Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne (BIVB) a été créé en 1989 suite à la fusion des Comités interprofessionnels de la Côte-d'Or, de l'Yonne et de la Saône-et-Loire, datant de 1960. Cette organisation interprofessionnelle, Figure 2, dirigée par des membres élus, réunit des acteurs de filière viticole et du négoce bourguignon, représentant près de 266 maisons de négoce, 16 caves coopératives et 3 577 domaines viticoles. Le BIVB possède un budget annuel d'environ 13 millions d'euros, alimenté par des cotisations professionnelles. La mission principale de l'interprofession est de valoriser les vins de Bourgogne en mettant en œuvre des stratégies visant à renforcer la réputation et la commercialisation des vins ; en participant à la préservation et la promotion des différents terroirs ; en encourageant l'adoption de pratiques viticoles durables et l'amélioration de la qualité des vins, par le biais de programmes de recherche ; et également en offrant des services de formations et de conseils pour les professionnels. Ainsi, le BIVB agit comme un catalyseur de la coopération entre les acteurs de la filière et joue un rôle de médiateur auprès des autorités publiques et des institutions européennes.

Par ailleurs, le BIVB, membre fondateur de l'association des Climats du vignoble de Bourgogne, s'est vu inscrire la notion de « Climats » au Patrimoine mondial de l'humanité en 2015. Cette inscription représente la reconnaissance d'un territoire unique au monde et constitue l'exemple même des intérêts défendus.

Au niveau organisationnel, le BIVB s'articule en quatre pôles aux prérogatives définies :

- Le pôle Technique et Qualité, qui a pour but d'apporter un soutien expert aux professionnels de la filière en finançant et participant à des projets de recherches, tout en s'appuyant sur les données de l'Observatoire (centre de collecte des données) et en tenant comptes des avancés et innovations.
- Le pôle Marchés et Développement, qui étudie les marchés nationaux et internationaux afin d'aider les professionnels dans leurs stratégies commerciales.
- Le pôle Marketing et Communication, qui a pour charge la promotion des vins de Bourgogne. Ce pôle a pour but de faciliter la commercialisation des vins grâce à la formation des prescripteurs (cavistes, restaurateurs, importateurs...) et la diffusion de messages adaptés aux consommateurs.
- Le pôle Administratif et Financier, qui représente l'ensemble des fonctions-support utile au bon fonctionnement de l'interprofession.

J'ai été accueillie au sein de l'équipe « Etudier-Expérimenter » du Pôle Technique et Qualité, qui mène des projets de recherches pluridisciplinaires et multipartenaires, sur des problématiques liées au matériel végétal, aux pratiques culturelles, aux itinéraires techniques et etc... Lors de mon stage, j'ai pris part au projet VOLTA, qui est une des deux approches utilisées pour répondre à la problématique de la longévité des vins blancs de Bourgogne. Le projet VOLTA, en collaboration avec la société Vinventions, permet de rendre compte des observations faites sur le terrain à différentes étapes de l'itinéraire technique, grâce à l'outil PolyScan. Ce programme permet de fournir de la donnée au second projet, APOGÉE, réalisé en collaboration avec l'Université de Bordeaux, qui interroge l'œnologie fondamentale pour traiter la question de la longévité.

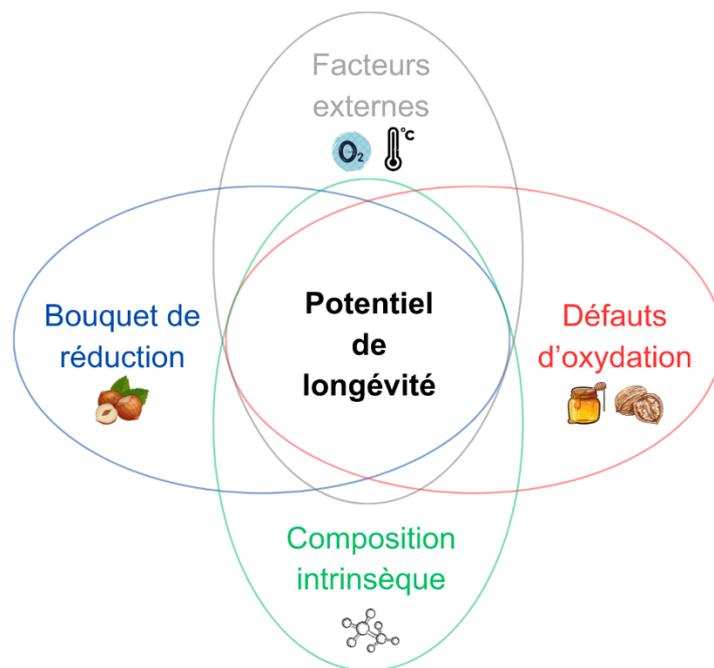


Figure 3 : Éléments constituant le potentiel de longévité.
(Réalisation personnelle)

I. ETAT DE L'ART

Originaire de Bourgogne, le Chardonnay Blanc fait partie de la famille des Noiriens, il est le descendant du Pinot Noir et du Gouais Blanc (PlantGrape, 2024). Ce cépage offre une diversité d'arômes avec des fruits tels que la pomme, la poire, l'abricot et les agrumes ; des notes de fleurs blanches ; des arômes plus complexes de noisettes grillées, mais également de vanille et de noix de coco issus de l'élevage souvent réalisé en barrique (Gammacurta et al., 2022). Cependant, à ce jour, peu de ces marqueurs sensoriels ont été étudiés d'un point de vue chimique. Seuls certains composés ont été caractérisés tels que des monoterpènes, des C13-norisoprénoïdes, des thiols, certains esters, des cétones et des lactones (Ancín-Azpilicueta et al., 2009; Capone et al., 2010, 2018; Cooke et al., 2009; Gambetta et al., 2014; Guchu et al., 2006; Jaffré et al., 2011; Leigh et al., 2016; Lorrain et al., 2006; Luo et al., 2019a). Le Chardonnay permet d'obtenir des vins équilibrés et amples dont l'expression varie selon le terroir. En Bourgogne, trois grands styles de Chardonnay se côtoient : des profils plutôt tendus, frais et minéraux dans le Chablisien ; des profils très intenses sur les fruits secs grillés en Côte d'Or ; et des vins plutôt tendres, souples et fruités vers Mâcon.

Depuis plusieurs années, la longévité de ces vins blancs fait la spécificité et la renommée de la Bourgogne. Cette notion de longévité fait écho à l'aptitude au vieillissement et au potentiel de garde, c'est-à-dire à la durée de vie du vin sans que sa qualité soit amoindrie (Dico du vin, 2011; Larousse, 2024). La longévité, Figure 3, des Chardonnay est caractérisée par le développement d'un bouquet de réduction et d'arômes complexes positifs (Gammacurta et al., 2019; Gros et al., 2017). Et à l'inverse, elle est limitée par les défauts d'oxydations, négatifs, tels que le brunissement et l'apparition de notes lourdes. Ainsi, la longévité résulte de l'équilibre entre les composés oxydés, oxydables et antioxydants, qui dépendent de la composition intrinsèque du vin et des pratiques œnologiques (Danilewicz, 2021; Ferreira & Bueno, 2015). Par conséquent, une meilleure compréhension de la construction de la longévité des vins blancs constitue un enjeu majeur de la filière.

Nota bene, dans cette partie sont présentés seuls les composés et mécanismes en lien avec l'oxydation.

A. Les défauts d'oxydation

1. Les molécules responsables de l'oxydation

De nombreuses molécules présentes dans les moûts et vins coexistent sous formes oxydées et réduites. L'oxydation d'un composant entraîne toujours la réduction d'un autre. Lors de la vinification, l'oxygène est l'agent oxydatif principal. Tandis que les principaux agents réducteurs sont les composés phénoliques, le dioxyde de soufre (SO₂), l'acide ascorbique et le glutathion. De ce fait, les défauts oxydatifs qui peuvent apparaître sont souvent liés aux réactions d'oxydation impliquant l'oxygène et les composés phénoliques.

a) L'oxygène

L'oxygène est essentiel au bon déroulement de la vinification. Cependant, une mauvaise gestion peut entraîner l'apparition de défauts. Il existe deux processus lorsque l'oxygène entre en contact avec le mout et le vin.

Tout d'abord, lorsque le vin est exposé à l'air, une dissolution progressive de l'oxygène dans le vin se produit, Figure 4 (a), jusqu'à ce qu'un équilibre de saturation par rapport à l'air soit atteint. À une température de 20°C, la quantité maximale d'oxygène dissout dans le vin est de 6ml/L, soit 8.4mg/L (Singleton, 1987). La quantité d'oxygène qui peut se dissoudre est inversement proportionnel à la température (Vivas, 1999). Après dissolution, il y a consommation de l'oxygène, Figure 4 (b).

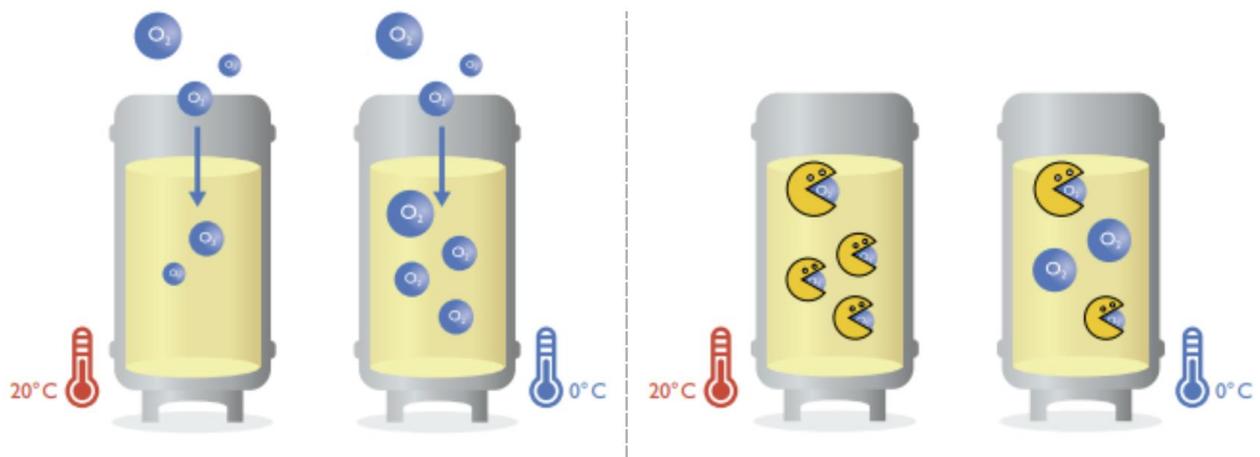


Figure 4 : Processus de dissolution (a) et consommation (b) de l'oxygène au contact du vin.
(Réalisation personnelle à partir de (BIVB, 2018))

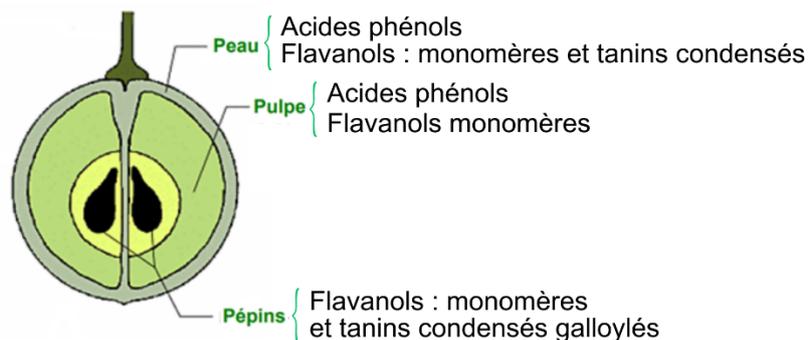


Figure 5 : Répartition des composés phénoliques de la baie.
(Réalisation personnelle)

Tableau 1 : Teneurs en composés phénoliques des vins blancs.

Composés phénoliques		Valeurs moyennes (mg/L)
Non-flavonoïdes	Acides hydroxy-benzoïques	10
	Acides hydroxy-cinnamiques	100-150
	Autres	<1
Flavonoïdes	Flavanols	35-70
	Flavonols	10
	Autres	Traces
	Anthocyanes	0
	Total	~170 {10-580}

À partir de (Clarke et al., 2022; Flanzy, 1998; Ribéreau-Gayon et al., 2020; Vivas et al., 2003)

La consommation de l'oxygène peut être réalisée selon trois grandes voies de consommation, tout au long de la vie du moût et du vin (Sablayrolles, 1990). Premièrement, il y a une consommation enzymatique au cours de laquelle l'oxygène intervient dans plusieurs réactions enzymatiques et dans la destruction de précurseurs d'arômes. Deuxièmement, la consommation microbiologique a lieu lors des fermentations, où l'oxygène est utilisé pour la formation de facteurs de survie indispensables à la multiplication des levures, limiter la formation de composés toxiques pour les levures et favoriser la formation des composés aromatiques (Andreasen & Stier, 1953; Fornairon-Bonnefond et al., 2002). Troisièmement, en l'absence de microorganismes vivants et d'enzymes, le vin entre dans sa phase de consommation chimique.

À l'inverse de la dissolution, les réactions de consommation de l'oxygène sont plus lentes et sont proportionnelles à la température. La quantité d'oxygène dissous dans un vin est déterminé par l'équilibre entre sa dissolution et sa consommation. Les manipulations augmentent la dissolution de l'oxygène tandis que pendant les périodes de d'élevage ou de stockage, la consommation prédomine. Une fois dissous, l'oxygène est consommé par les molécules présentes dans le vin.

La capacité du moût et du vin à résister à l'oxydation dépend alors du temps de contact entre l'air et le vin, ainsi que de sa composition chimique. Si la teneur en antioxydants est faible et la teneur en oxydants et molécules oxydables est forte, alors le vin ne pourra pas résister aux effets de la consommation d'oxygène, entraînant un déséquilibre des réactions d'oxydoréductions. Cela a pour conséquence une augmentation des réactions d'oxydations pouvant aboutir à l'apparition de défauts.

b) Les composés phénoliques

Les composés phénoliques sont des produits du métabolisme secondaire des plantes et sont les principaux substrats d'oxydation du vin (Salacha et al., 2008; Singleton, 1987). Ils sont constitués d'un ou plusieurs cycles benzéniques portant un ou plusieurs groupements hydroxyles (Sarni-Manchado & Cheynier, 2006). Leurs propriétés physico-chimiques intrinsèques sont d'être des acides faibles, nucléophiles, polarisables, réducteurs et capables d'établir des liaisons hydrogènes. Dans le vin, les composés phénoliques constituent une partie de la trame aromatique, participent à la couleur et ont un rôle d'antioxydant naturel. Ces composés proviennent des différentes parties de la grappe du raisin, Figure 5, et dans les vins blancs, le contenu phénolique total oscille entre 10 et 580mg/L, Tableau 1. Les principaux composés phénoliques du raisin ont été caractérisés et ont été classés en deux grandes familles : les non-flavonoïdes et les flavonoïdes (Chira et al., 2008).

(1) Les non-flavonoïdes

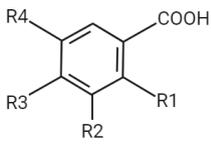
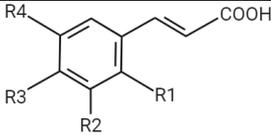
Les non-flavonoïdes regroupent les acides phénols, dérivés de l'acide benzoïque et de l'acide cinnamique, ainsi que les stilbènes (resvératrol).

Les acides hydroxy-benzoïques, Tableau 2 (a), possèdent un squelette carboné de type C6-C1 et se différencient par la substitution de leur noyau benzénique. Seul l'acide gallique a été identifié dans le raisin sous formes libres, glycosylées ou estérifiées.

Les acides hydroxy-cinnamiques, Tableau 2 (b), ont une structure en C6-C3 et sont majoritairement sous formes estérifiées avec l'acide tartrique. Les esters conjugués comme l'acide caftarique (caféoytartrique) et coutarique (p-coumaroyltartrique) sont les formes les plus retrouvées.

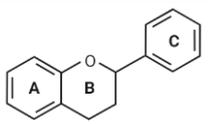
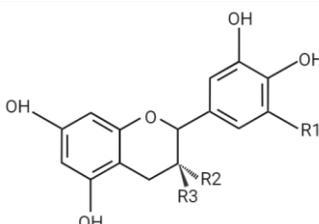
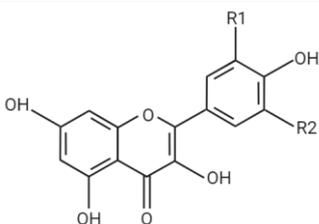
Ces composés sont en grande partie à l'origine du brunissement (Cheynier et al., 1988, 1989, 1990; Cheynier & Van Hulst, 1988; Fernandez-Zurbano et al., 1995, 1998).

Tableau 2 : Les principaux non-flavonoïdes et leurs structures chimiques.

(a) Acide Benzoïque		R1	R2	R3	R4		
	Acide gallique	H	OH	OH	OH		
(b) Acide Cinnamique		Forme libre	Forme estérifiée	R1	R2	R3	R4
	Acide p-coumarique	Acide coutarique	H	H	OH	H	
	Acide caféique	Acide caftarique	H	OH	OH	H	

(Réalisation personnelle)

Tableau 3 : Les principaux flavonoïdes et leurs structures chimiques.

(a) Flavonoïdes	A	B	C	
	Noyau phloroglucinol	Noyau catéchol	Cycle pyranique	
(b) Flavanols	R1	R2	R3	
	(+)-catéchine	H	H	OH
	(-)-épicatéchine	H	OH	H
	(-)-épigallocatechine	OH	OH	H
	(-)-épicatéchine-3-O-gallate	OH	O-gallate	H
(c) Flavonols	R1	R2		
	Quercétine	OH	H	
	Kaempférol	H	H	

(Réalisation personnelle)

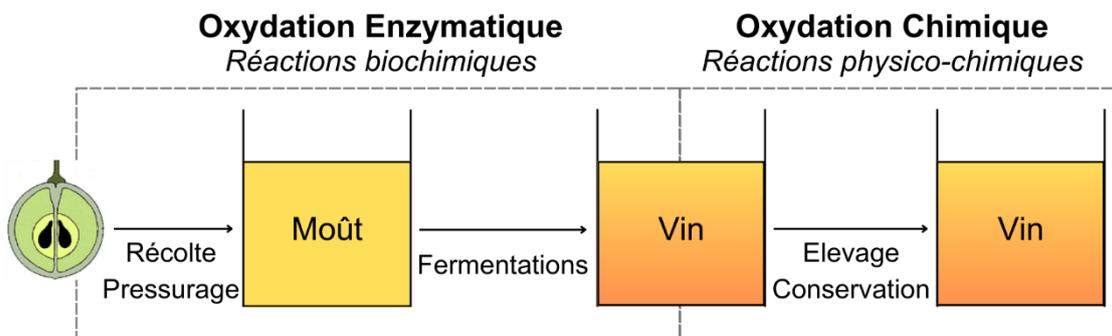


Figure 6 : Schéma simplifié des mécanismes d'oxydation des vins blancs.

(Réalisation personnelle)

(2) Les flavonoïdes

Les flavonoïdes, Tableau 3 (a), sont caractérisés par une structure commune en C6-C3-C6 constituée de deux noyaux benzéniques A et B reliés par un cycle pyranique C. Les principales sous-familles sont les flavanols, les flavonols, les flavanonoles et les flavones. Dans les vins blancs ces molécules sont responsables de l'astringence et de l'amertume. Ces composés sont des pigments jaunes contribuant à la couleur des baies et ils sont également impliqués dans des réactions de brunissement (Biau, 1996; Carando et al., 1999; Ferrer-Gallego et al., 2016; McManus et al., 1985). Parmi eux, les flavanols et les flavonols sont les plus représentés.

Les flavanols ou flavan-3-ols, Tableau 3 (b), existent sous forme de monomères (catéchines) et de molécules condensées (tanins condensés ou pro anthocyanidines). Les différentes formes peuvent également être trouvées sous formes estérifiées, le plus souvent avec de l'acide gallique, elles sont alors galloylées. Ainsi, les principaux monomères identifiés dans le raisin sont la (+)-catéchine et la (-)-épicatéchine, l'(-)-épigallocatechine, et l'(-)-épicatéchine-3-O-gallate (Jouin, 2019; Padilla-González et al., 2022; Santos-Buelga et al., 1995; Tsai Su & Singleton, 1969; Zerbib, 2018). Cependant dans la baie les formes polymérisées sont prédominantes.

Quant aux flavonols, Tableau 3 (c), ils existent sous formes d'aglycones ou glycosylées. Les deux principaux flavonols identifiés dans la baie sont les aglycones de la quercétine et du kaempférol (Masa & Vilanova, 2008; Ribéreau-Gayon, 1974).

(3) Composés phénoliques issus du bois

Les tanins hydrolysables, ellagitanins ou gallotanins, sont des composés phénoliques extraits du bois des barriques ou apportés au vin par l'emploi de tanins œnologiques lors de son élaboration. Ces tanins exogènes ont un impact sur la structure du vin et sont impliqués dans des réactions d'oxydation (Nikolantonaki et al., 2019).

2. Principes et mécanismes de l'oxydation

L'oxydation est réalisée selon deux étapes distinctes et successives, Figure 6. Premièrement, a lieu l'oxydation enzymatique dans le moût et deuxièmement l'oxydation chimique dans le vin. Ces réactions génèrent des *ortho*-quinones (*o*-quinone), qui sont des intermédiaires très réactifs impliqués dans la formation de pigments et d'aldéhydes volatils, marqueurs de l'oxydation. Les mécanismes d'oxydation reposent principalement sur la réactivité des composés en présence d'oxygène. Néanmoins, ils sont également influencés par la présence de cofacteurs, le pH, la température et la teneur en éthanol.

a) L'oxydation enzymatique

Les réactions d'oxydations enzymatiques ont lieu dès qu'il y a rupture de l'intégrité cellulaire de la baie de raisin. Ces réactions sont catalysées par des polyphénols oxydases (PPO) telles que la tyrosinase (catécholoxydase) spécifique au raisin, et la laccase produite par *Botrytis cinerea* dans le cas de raisins altérés. En présence d'oxygène, Figure 7, les PPO induisent, grâce à leur site cuprique, l'hydroxylation des monophénols en *o*-diphénols, puis oxydent celles-ci en *o*-quinones. Les substrats préférentiels des PPO sont les acides caftarique et coutarique (Singleton et al., 1985) et les catéchines. Cependant, la laccase est capable de réagir avec d'autres molécules telles que l'acide gallique et l'acide ascorbique, et peut ainsi être à l'origine de nombreux problèmes de stabilité des vins issus de vendanges altérées.

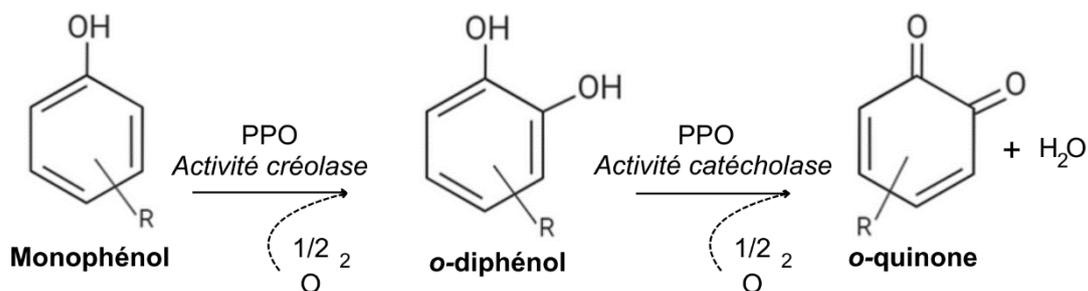


Figure 7 : Mécanismes d'oxydation enzymatiques aboutissant à la formation d'o-quinone à partir d'un monophénol, en présence d'oxygène.
(Réalisation personnelle à partir de (Mouls, 2024))

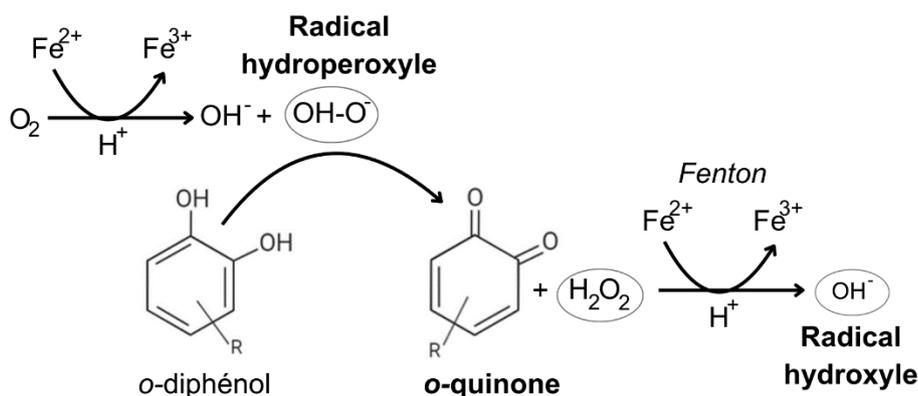


Figure 8 : Mécanismes d'oxydation chimiques aboutissant à la formation d'o-quinone et de radicaux libres réactifs, en présence d'oxygène et d'ions métalliques.
(Réalisation personnelle)

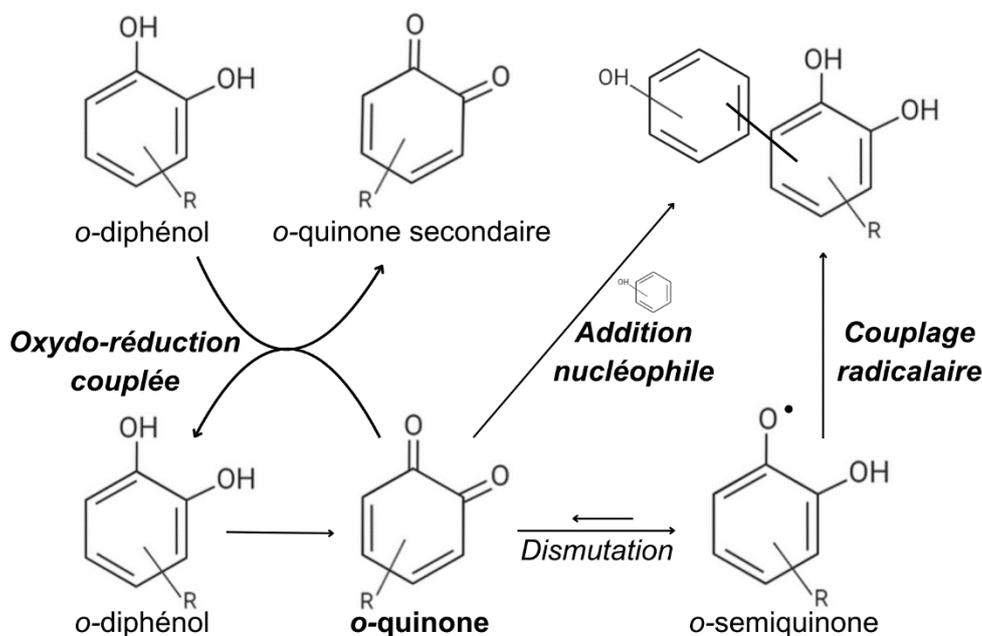


Figure 9 : Principaux mécanismes réactionnels impliquant les o-quinones.
(Réalisation personnelle)

b) Les réactions d'oxydations chimiques et l'importance des cofacteurs

Les réactions d'oxydations chimiques sont plus lentes que les réactions enzymatiques. Elles se déroulent généralement à l'issue de la fermentation alcoolique. Dans le vin, l'oxygène nécessite la présence d'ions métalliques pour oxyder les composés phénoliques, contenant un catéchol ou un groupe galloyle, tels que les catéchines, l'acide gallique, l'acide caféique et les esters correspondants (Li et al., 2008). Les métaux induisent l'oxydation des phénols couplée à la réduction de l'oxygène, Figure 8. Sous l'action du fer, l'oxygène est transformé en radical hydroperoxyde (HO_2^\cdot) qui est alors capable de réagir avec les noyaux phénols et d'aboutir à la formation d'une *o*-quinone et de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Ensuite, les métaux sont capables d'initier la réaction de Fenton au cours de laquelle, l' H_2O_2 associé à l'ion ferreux (Fe^{2+}) aboutit à la formation d'espèces réactives de l'oxygène, dont le radical hydroxyle (HO^\cdot). Ainsi, les ions métalliques agissent comme des catalyseurs des réactions d'oxydations impliquées dans la formation d'*o*-quinone et de l' H_2O_2 . De plus, ils participent également à la formation de molécules intermédiaires telles que l'acétaldéhyde et l'acide glyoxylique, qui sont impliquées dans la formation de pigments bruns ou de composés aromatiques (Danilewicz, 2003).

c) Les composés d'oxydation et leurs impacts dans le moût et le vin

Les *o*-quinones issues des mécanismes enzymatiques et chimiques continuent de réagir en fonction de leurs propriétés rédox et de leur affinité électronique. Plusieurs voies sont possibles, Figure 9, avec d'une part des réactions d'oxydo-réductions qui impliquent des réducteurs tels que d'autres *o*-diphénols, et d'autre part des additions nucléophiles, des polycondensations ou des couplages radicalaires. Ces différentes cascades réactionnelles ont un impact direct sur la formation de pigments colorés et la formation de composés volatils, participant à la production de marqueurs typiques de l'oxydation (Mathew & Parpia, 1971; Pons, 2010; Rizzi, 2006). Par ailleurs, les *o*-quinones sont capables d'établir des réactions rapides d'oxydoréductions entraînant la régénération du phénol initial ou alors la formation d'une *o*-quinone secondaire, Figure 9, qui pourra à son tour être oxydée par oxydo-réduction couplée. Cela créer un cycle rédox où les substrats peuvent théoriquement être illimités.

(1) Le brunissement du moût et du vin

Les *o*-quinones présentent une forte réactivité pour les composés nucléophiles en raison de leur affinité électronique. Les réactions entre ces composés aboutissent à la formation d'adduits d'*o*-quinones qui sont des composés colorés. Ces adduits peuvent se polymériser et se condenser avec d'autres composés formant des pigments jaunes ou bruns (Robards et al., 1999). En effet, les flavanols peuvent par auto-oxydation générer des *o*-quinones capables d'établir des liaisons bi-aryle et bi-aryle éther entre deux flavanols. Ensuite, une oxydation supplémentaire de ce dimère entraîne un réarrangement et la formation de pigments jaunes. Par exemple, Figure 10, une addition nucléophile entre la catéchine et sa *o*-quinone ou le couplage radicalaire des semi-quinones correspondantes conduit à la formation de plusieurs dimères incolores, au pH des vins blancs, avec des liaisons de type biphényle et biphényl-éther. Cependant, les dimères à liaison de type biphényle peuvent continuer d'évoluer et s'oxyder en déhydrocatéchine A, qui est un pigment jaune (Guyot et al., 1996). Enfin, d'autres pigments colorés comme le xanthylum sont issus de la polycondensation de deux flavanols par le biais d'un aldéhyde tel que l'acétaldéhyde ou l'acide glyoxylique, Figure 11. Le produit issu suite à la fixation de l'aldéhyde est incolore. Cependant le dimère peut se réarranger et former des pigments jaunes au pH du vin (Fulcrand et al., 1996, 1997). En somme, toutes ces cascades réactionnelles aboutissent à la formation de composés colorés responsables du brunissement.

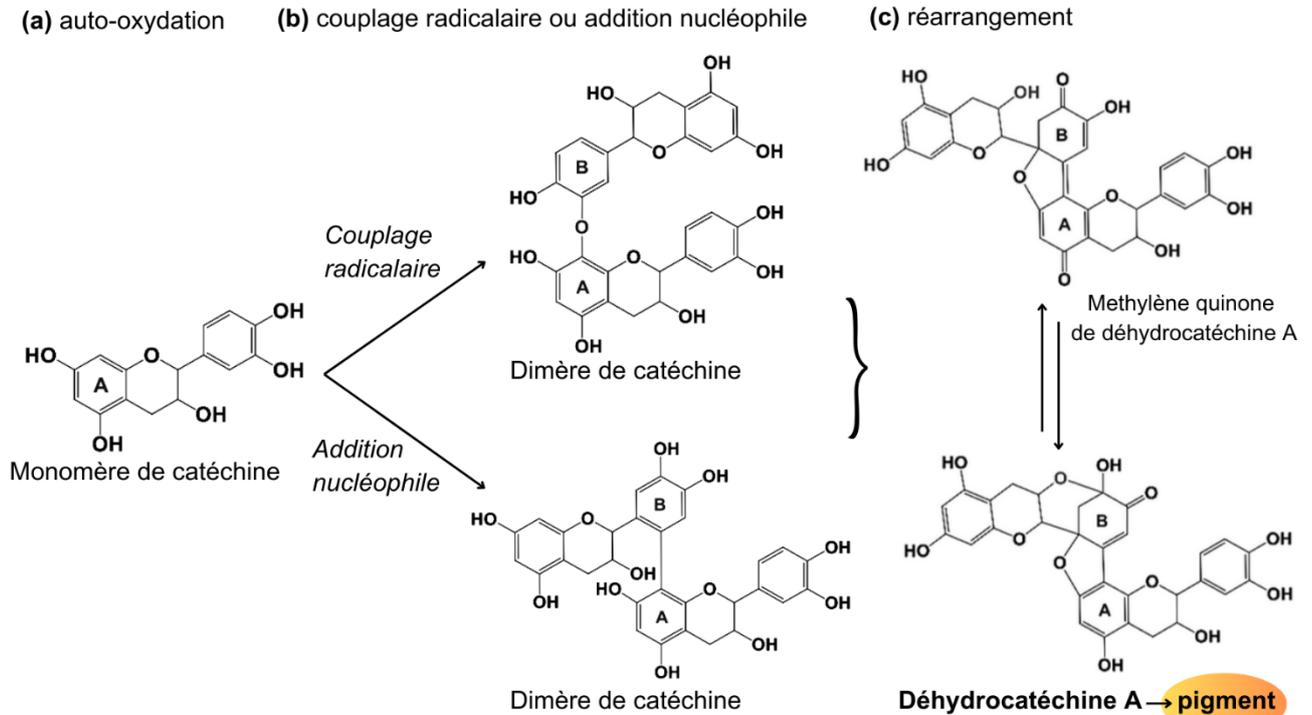


Figure 10 : Cascades de réactions aboutissant à la formation de pigments colorés.
(Réalisation personnelle à partir de (Mouls, 2024))

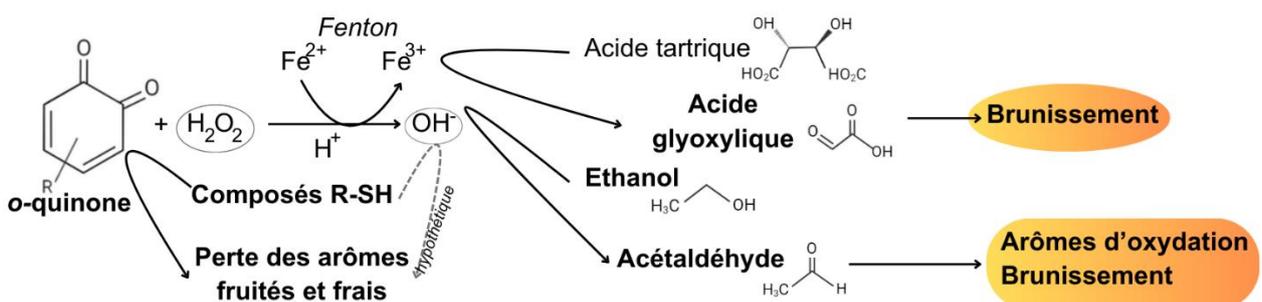


Figure 11 : Mécanismes réactionnels aboutissant aux modifications organoleptiques.
(Réalisation personnelle)

(2) L'apparition d'arômes oxydatifs

Les *o*-quinones et les radicaux libres sont capables de réagir avec différentes molécules et d'induire des modifications organoleptiques, Figure 11. Par exemple, leurs interactions avec les aromes tels que les thiols sont à l'origine d'une diminution des notes fraîches fruitées et florales (Nikolantonaki, 2010; Nikolantonaki & Waterhouse, 2012; Waterhouse & Laurie, 2006). De plus, le radical HO• est capable d'oxyder les alcools supérieurs, les acides organiques et l'éthanol (Elias et al., 2009; Márquez et al., 2019; Wildenradt & Singleton, 1974) favorisant la production d'aldéhydes volatils responsables de notes aromatiques lourdes. Ainsi, plusieurs cascades réactionnelles sont à l'origine de la formation d'arômes typiques de l'oxydation tels que :

- L'acétaldéhyde ;

L'acétaldéhyde, ou éthanal libre, est un sous-produit de la fermentation alcoolique et peut également résulter de l'oxydation de l'éthanol pendant l'élevage ou la conservation en bouteille, en présence d'oxygène, Figure 11. Dans le vin, les concentrations normales se situent autour de 40mg/L. Au pH du vin, 99% de l'éthanal est combiné avec au SO₂ ou aux flavonols. Toutefois, lorsque ces combinaisons ne sont plus possibles, l'éthanal reste libre. Si la teneur en éthanal libre devient supérieure à 6mg/L, alors une odeur de pomme blette apparaît (Granès et al., 2019; Pons, 2010).

- Le sotolon ;

Le sotolon ou 4,5-diméthyl-3-hydroxy-2(5)H-furanone, est un hétérocycle volatil qui résulte d'une réaction d'aldolisation entre l'acétaldéhyde et l'acide α -cétobutyrique (König et al., 1999; Pons, 2010). La disponibilité de ces deux précurseurs dépend fortement de la quantité d'oxygène dissous dans le vin. En effet, la concentration en éthanal dépend indirectement de la quantité d'oxygène, tout comme l'acide α -cétobutyrique qui peut provenir de la dégradation de l'acide ascorbique en présence d'O₂ ou de la désamination de la thréonine par *Saccharomyces cerevisiae* lors de la FA. Le sotolon a des arômes intenses de curry et de noix perceptibles dès 8 μ g/L. Tandis que les teneurs retrouvées dans les vins sont généralement inférieures à 10 μ g/L, elles peuvent atteindre 1000 μ g/L dans les vins oxydés (Lavigne et al., 2008; Pons et al., 2008; Silva Ferreira et al., 2003).

- Le phénylacétaldéhyde et le méthional ;

Le phénylacétaldéhyde et le méthional sont issus du métabolisme levurien, mais ils peuvent également être issus d'acides aminés via la dégradation de Strecker (Bergler, 2020; Yaylayan, 2003). Le phénylacétaldéhyde a une odeur caractéristique de rose fanée et de miel, tandis que le méthional est responsable d'arôme de pomme de terre bouillie. Les seuils de perceptions de ces deux aldéhydes sont respectivement de 1 et 0.5 μ g/L, et leurs teneurs retrouvées dans les vins varient entre 10 et 220 μ g/L (Culleré et al., 2007; Escudero et al., 2000).

- L'aminocétophénone ;

Le 2-aminoacétophénone est biosynthétisé à partir du tryptophane selon une voie physico-chimique ou enzymatique. Cette molécule, à l'odeur de naphthaline, a un seuil de perception de 0.8 μ g/L et sa concentration dans les vins peut atteindre 5 μ g/L (Rapp et al., 1993, 1995).

3. Les méthodes d'évaluation

Différentes méthodes d'évaluation permettent de se rendre compte de la capacité oxydative ou antioxydante d'un vin, Annexe 1. L'étude de ces différents composés permet d'évaluer, dans une certaine mesure, le risque d'apparition des défauts d'oxydation (De Beer et al., 2004).

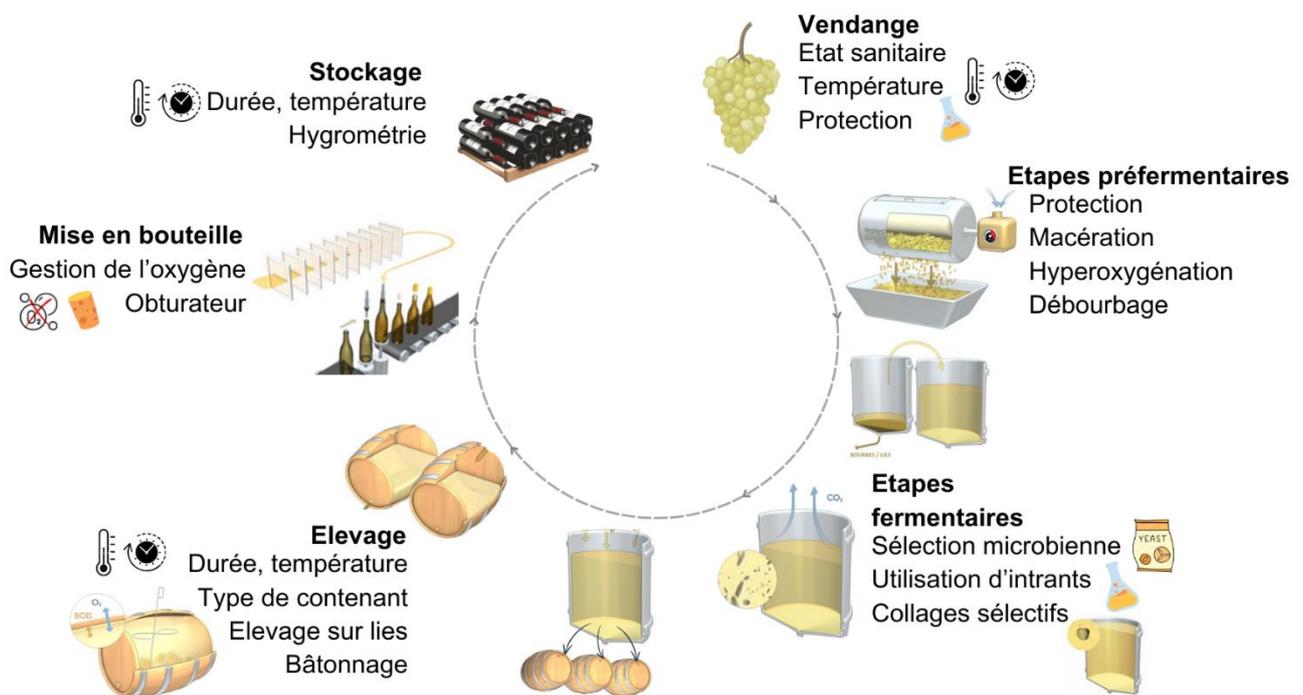


Figure 12 : Les pratiques œnologiques impliquées dans la construction du potentiel de vieillissement du vin.
(Réalisation personnelle)

Tableau 4 : Principales molécules antioxydantes utilisées en vinification.

	Propriétés	Avantages	Inconvénients
SO₂	Antiseptique, antioxydant, antioxydasique, dissolvant.	Utilisation simple.	Allergène, odorant.
Acide ascorbique	Antioxydant.	Efficacité rapide.	Effet à court terme, peut devenir pro-oxydant. A utiliser en combinaison avec du SO ₂ .
Glutathion	Antioxydant.	Naturellement présent, protège indirectement les arômes.	Ajout non autorisé.

(Réalisation personnelle)

B. L'importance des pratiques œnologiques

Même si à ce jour les connaissances scientifiques ne permettent pas d'expliquer l'ensemble des mécanismes d'oxydation, différentes pratiques œnologiques ont été identifiées afin de les limiter, Figure 12 (Schneider, 2016).

Tout d'abord, au niveau de la vendange il est préférable de la récolter saine et de la protéger lors du transport avec du dioxyde de soufre (SO₂) ou de glace carbonique. Tout comme, il est préférable de récolter à basse température et de limiter la trituration pour ralentir l'activité des PPO et protéger les moûts de l'oxydation enzymatique (Sayavedra-Soto & Montgomery, 1986). Un traitement rapide de la vendange est préconisé afin de limiter le temps de contact entre les parties liquides et solides, et ainsi extraire moins de composés phénoliques sensibles. Cependant cette approche peut être controversée car des macérations pelliculaires à froid permettent d'extraire davantage de composés aromatiques.

Au niveau du pressurage, aucune étude n'a démontré de lien direct entre les différentes techniques et leurs impacts sur l'apparition de défauts d'oxydation. Après pressurage et avant départ en fermentation, une hyper oxygénation du moût peut se révéler utile pour diminuer la charge en composés facilement réactifs tels que les acides hydroxy cinnamiques et les flavonols, afin de limiter l'apparition de défauts d'oxydation et améliorer la stabilité des vins à posteriori (Schneider, 1998). Cette technique consiste à l'exposer à des doses élevées d'oxygène (40mg/L) afin d'accélérer les réactions d'oxydation et de brunissement. Ensuite, l'ensemble de la matière oxydée sédimente au fond de la cuve et est éliminée lors du débouillage. Cette méthode fait l'objet de controverses vis-à-vis de la préservation de la qualité aromatique (Cejudo-Bastante et al., 2011; Rihak et al., 2021; Roland, 2010; Ugliano, 2013). Cependant, l'utilisation de cette technique semble adaptée au Chardonnay car ce cépage est pauvre en composés aromatiques sensibles à l'oxygène à ce stade. Il y a donc peu de risques de pertes aromatiques.

Pour la fermentation, des études récentes ont montrées que l'ensemencement avec des levures non-*saccharomyces* bio protectrices telle que *Metschnikowia pulcherrima* peut aider à réduire l'intensité du brunissement, car ces levures consomment l'oxygène très efficacement et diminuent sa disponibilité pour les autres réactions (Bustamante et al., 2024; Giménez et al., 2023). L'emploi de levures favorisant le relargage du glutathion (GSH) peut également être une option. Le glutathion est capable de réagir avec les *o*-quinones d'acide caftarique et de former l'acide 2-S-glutathionyl-trans-caffeoyltartaric, ou Grape Reaction Product (GRP) qui est un composé non coloré, Figure 14. Ainsi, le GSH neutralise les *o*-quinones et stoppe la chaîne d'oxydation à l'origine du brunissement du moût (Kritzinger et al., 2013). Cependant, le GRP peut à nouveau réagir et former des *o*-quinones de GRP impliquées dans le brunissement.

Aux différentes étapes de la vinification, limiter les soutirages et les pompages couplé à un emploi de matériel adapté et correctement dimensionné, permet de limiter les forts apports en O₂. Tout comme l'utilisation d'intrants œnologiques, Tableau 4, peut aider à protéger le moût et le vin des réactions d'oxydation. Par exemple, le SO₂ permet de protéger indirectement de l'O₂ en réagissant avec l'H₂O₂ et les radicaux hydroxyles, Figure 13 (Giacosa et al., 2019). Il est aussi capable de réduire les *o*-quinones en formant des adduits appelés sulfones, accélérant ainsi la consommation d'oxygène. Le SO₂ peut également se combiner aux aldéhydes, limitant alors les différentes réactions pouvant conduire à la formation de pigments bruns ou de composés volatils indésirés (Makhotkina & Kilmartin, 2013; Nikolantonaki et al., 2022).

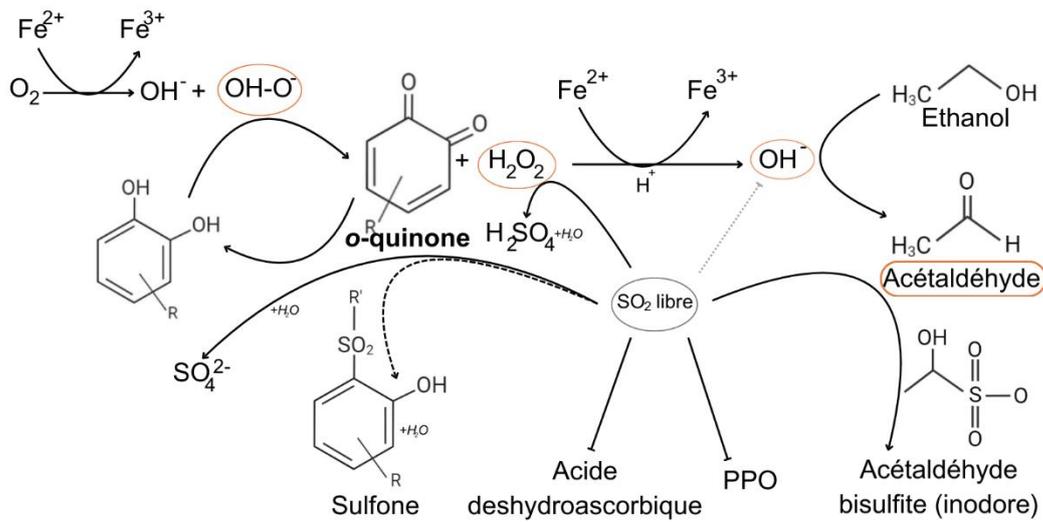


Figure 13 : Mécanismes d'actions du dioxyde de soufre.
(Réalisation personnelle)

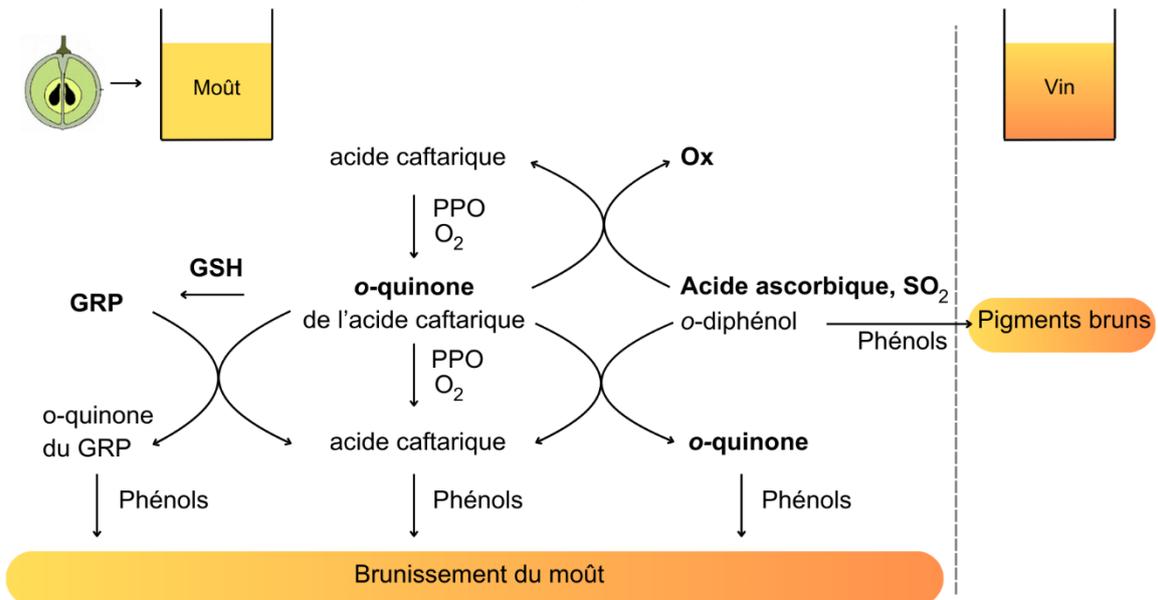


Figure 14 : Rôle de l'acide ascorbique et du glutathion dans les réactions d'oxydation.
(Réalisation personnelle à partir de (Roland, 2010))

Tableau 5 : Principaux gaz inertes utilisés en œnologie.

	Caractéristiques	Avantages	Inconvénients
Azote (N₂)	Densité : 0.97	Incolore, inodore, peu soluble, économique.	Potentiellement asphyxiant dès que O ₂ <17%, risque d'assécher le vin, peut dégazer le CO ₂ contenu dans le vin.
Dioxyde de carbone (CO₂)	Densité : 1.53 Formes : gaz, neige carbonique	Incolore, inodore à faible concentration, très soluble, pouvoir frigorifique.	Dangereux, risque de sur-carbonatation, peut donner du perlant et de la dureté au vin.
Argon (Ar)	Densité : 1.38	Non toxique, peu soluble.	Très onéreux.

(Réalisation personnelle)

L'ajout d'acide ascorbique permet également de retarder les réactions de brunissement en consommant l'O₂ utile au fonctionnement des PPO et en régénérant les acides hydroxycinnamiques à partir des o-quinones correspondantes, Figure 14. Néanmoins, lors de ces réactions, la consommation rapide de l'O₂ génère de l'H₂O₂, et l'acide ascorbique, réducteur, devient de l'acide déhydroascorbique, oxydant. Sous sa forme oxydée il réagit facilement avec des catéchols pour former des o-quinones qui colorent le moût. Afin de limiter cet effet, l'utilisation simultanée de SO₂ est recommandée (Barril et al., 2016).

Enfin, la réalisation des collages sélectifs pendant la fermentation est également une alternative pour réduire la charge en composés réactifs (Renouf et al., 2013).

Ensuite, à l'issue des fermentations, l'élevage du vin à une température stable et optimale permet de prévenir l'oxydation en limitant la solubilité et la consommation de l'O₂. Les interactions entre le vin et l'O₂ peuvent aussi être diminuées grâce à l'ouillage, l'utilisation de chapeaux flottants ou l'inertage au gaz. L'inertage gazeux est une action préventive qui consiste à saturer le milieu avec un gaz inerte, tel que l'azote (N₂), le dioxyde de carbone (CO₂) ou l'argon (Ar), Tableau 5. Cela crée d'un ciel gazeux à la surface du vin qui ralentit la cinétique de dissolution de l'oxygène (Devatine et al., 2011). Cependant l'inertage seul ne permet pas de s'affranchir totalement des techniques antioxydantes plus conventionnelles (sulfitage...).

De plus, l'élevage sur lies associé à un bâtonnage peut également être pratiqué car cette opération est jugée, de manière empirique, comme un moyen d'harmoniser d'une part les risques d'oxydation liés à l'oxygénation et d'autre part de réduction liée à l'accumulation des lies. Cependant, les impacts de cette technique sur la longévité des vins sont discutés (Blaise et al., 2005).

Par ailleurs, le type de contenant va influencer les transferts entre le vin et les éléments extérieurs. Bien que poreux, l'élevage sous-bois peut être bénéfique et ménager l'oxydation. En effet, différents composés apportés par le bois sont très performants pour protéger le vin de l'oxydation. D'autre part, selon l'intensité de chauffe, de nouveaux arômes sont conférés au vin tels que des notes vanillées et de noisettes grillées. Ces molécules participent au développement du bouquet de réduction, un paramètre organoleptique très recherché dans le vieillissement des Chardonnay de Bourgogne (Carpena et al., 2020; González-Centeno et al., 2019; Nunes et al., 2017).

Enfin, lors de la mise en bouteille, les apports en oxygène peuvent être diminués via l'inertage du système et des bouteilles avec un gaz neutre. Le choix de l'obturateur est également à raisonner selon sa perméabilité car c'est un lieu d'échange entre l'intérieure de la bouteille et le milieu ambiant. Selon la perméabilité il peut apporter entre 0.5 et 3mg/L d'O₂ par an, ce qui n'est pas négligeable (Furtado et al., 2021; Vidal & Moutounet, 2008). La conservation et le stockage doivent se faire dans un lieu avec température stable et une hygrométrie favorable afin de limiter les échanges de l'oxygène au travers de l'obturateur.

C. La maturité, un élément de réponse vers la compréhension de la longévité ?

Ces dernières années, la majorité des recherches scientifiques sont basées sur les réactions dans les moûts et les vins, mais très peu sur la baie de raisin. Caractériser et évaluer l'impact de la maturité de la vendange constitue ainsi un pas de plus vers la compréhension de la construction de la longévité.

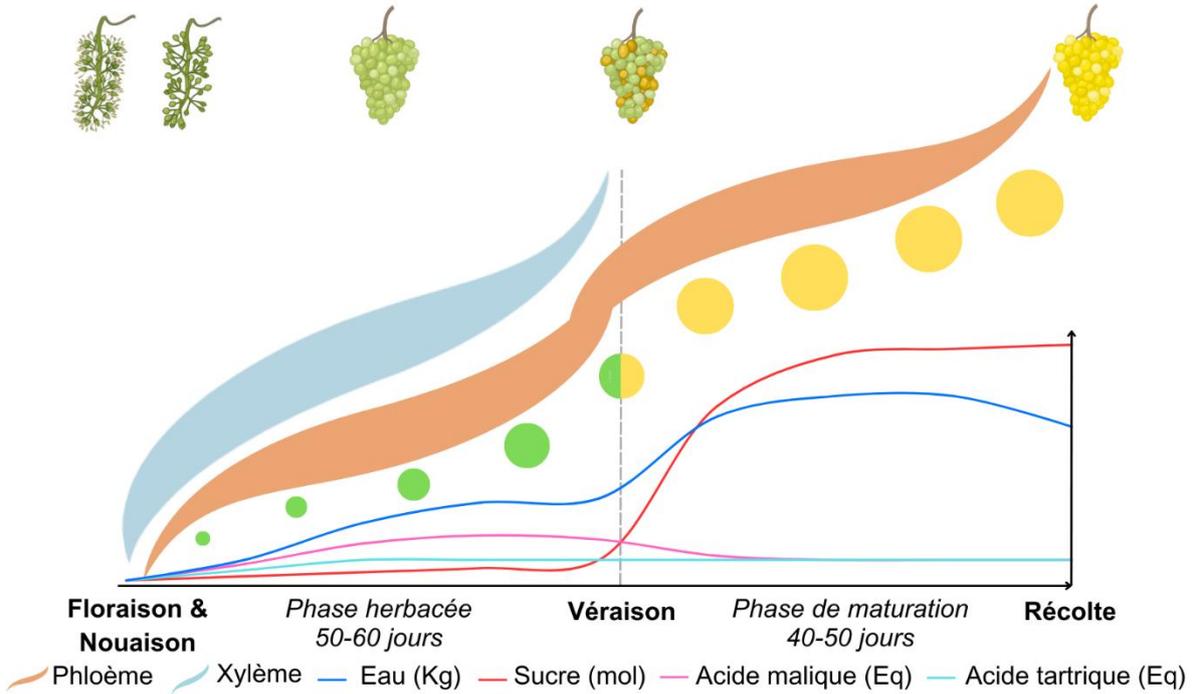


Figure 15 : Etapes de maturation des baies et représentation de l'évolution de certains composés. (Réalisation personnelle à partir de (Kennedy, 2002))

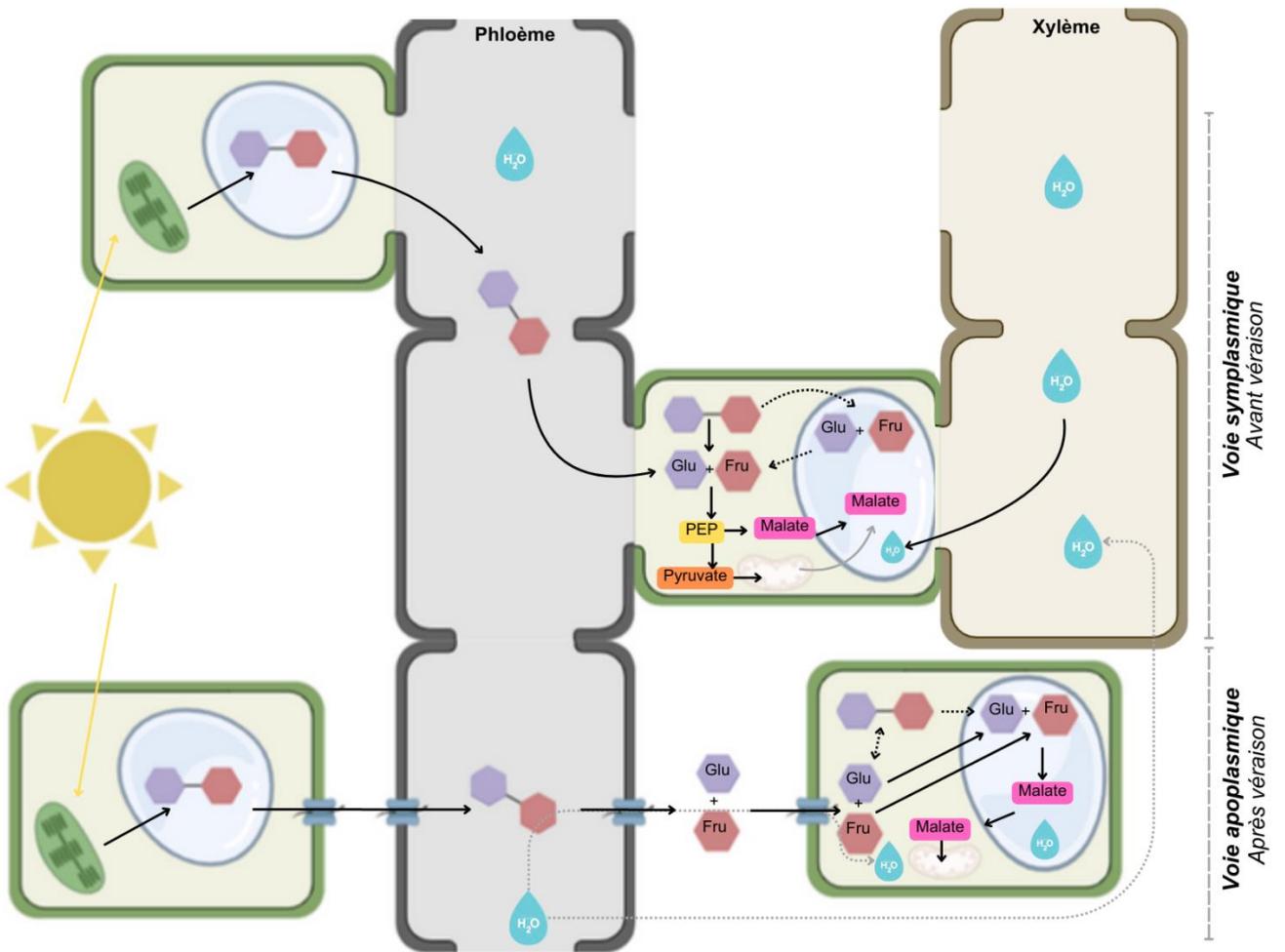


Figure 16 : Schématisation des mécanismes intracellulaires de la maturation de la baie. (Réalisation personnelle)

1. La maturation des baies

Après la nouaison la croissance de la baie se divise en deux périodes : la phase herbacée et la phase de maturation, Figure 15 (Carbonneau et al., 2020; Deloire, 2010).

Lors de la phase herbacée, ou stade vert, la croissance de la baie est due à l'accumulation progressive d'eau et de solutés dans la vacuole, facilitée par l'augmentation des transporteurs membranaires à l'origine d'un afflux d'ions chargés positivement. Ainsi, le saccharose, produit par la photosynthèse, est transféré du phloème vers le cytoplasme par la voie symplastique, Figure 16, où il est dégradé en glucose et fructose, générant alors des acides organiques et du pyruvate. Le pyruvate est utilisé par les mitochondries tandis que les acides organiques sont stockés dans la vacuole. Le mécanisme d'entrée des acides dans la vacuole augmente la pression osmotique et crée un fort appel d'eau provenant du xylème, contribuant au développement de la baie.

Ensuite, la baie entre dans une phase de maturation, caractérisée par un grandissement cellulaire, Figure 15. Le passage d'un stade à l'autre est appelé la véraison. A ce stade, la baie change de couleur, se ramolisse et s'enrichit en sucre. A la véraison, une abscission des vaisseaux du xylème rompt les communications et isole les baies du reste de la plante. Le phloème assure l'intégralité des besoins trophiques des baies par la voie apoplasmique, Figure 16. Le saccharose est transporté vers la cellule grâce à des récepteurs membranaires et différents mécanismes permettent de le dégrader en glucose et fructose, qui sont ensuite stockés dans la vacuole. Cependant, à ce stade il n'y a plus de co-génération de malate et de pyruvate dans le cytosol. Le malique contenu dans la vacuole est alors déstocké par les mitochondries, entraînant une diminution de l'acidité et une augmentation du pH (Conde et al., 2007; Dai et al., 2011; Gerós et al., 2012).

Si la baie accumule les sucres à vitesse constante, il y a un décalage entre cette augmentation et la dégradation de l'acide malique. Ainsi, les dates de récolte sont à raisonner en fonction de l'évolution de ces différents paramètres. Cependant, le décalage entre l'accumulation du sucre, des acides, de la synthèse aromatique, et du développement asynchrone des baies au sein d'une grappe rendent l'exercice complexe (Shahood et al., 2015).

2. Les paramètres importants à suivre lors de la maturation du raisin

Afin de prendre des décisions éclairées au moment de la récolte, plusieurs paramètres sont à suivre, Tableau 6.

Premièrement, le suivi du poids des baies est essentiel dès la véraison, afin de s'assurer de leur alimentation via le phloème. Un suivi fréquent permet d'établir une cinétique de croissance et d'observer un ralentissement à l'approche de la maturité.

Deuxièmement, le suivi de l'accumulation des sucres dans la baie est un indicateur physiologique de l'activité photosynthétique de la plante. Lors de la maturation, les baies accumulent des sucres fermentescibles, glucose et fructose, et également quelques sucres non-fermentescibles comme les pentoses. Suivre l'accumulation des sucres fermentescibles permet d'estimer le titre alcoométrique volumique potentiel (TAVP) des futurs vins. L'accumulation des sucres est progressive jusqu'à atteindre un certain plateau autour de 200g/L. Ensuite, l'évolution de la concentration dépend de la variation du poids des baies. Un grossissement entraîne une dilution, tandis qu'un flétrissement provoque une concentration (Deloire et al., 2021).

Tableau 6 : Principaux paramètres suivis lors de la maturation de la baie de raisin.

Paramètres	Pourquoi ?	Interprétation	Limites
Poids des baies	S'assurer de la croissance trophique des baies.	Augmentation progressive puis ralentissement. Eventuelle perte de poids pouvant être le signe d'une évapotranspiration excessive.	Echantillonnage très rigoureux à faire. Variation du poids pouvant être impacté par les conditions météorologiques (pluie, sécheresse).
Concentration en sucre	S'assurer de l'activité photosynthétique ; Estimer le TAVP et la fermentescibilité du moût.	Augmentation jusqu'à un plateau d'accumulation. Ensuite variation par concentration ou dilution ; Calcul du TAVP : $16.83g$ de sucres fermentescibles correspondent théoriquement à 1%vol. d'alcool.	Forte variabilité selon l'unité de mesure choisie. Gradient d'accumulation au niveau de la grappe et des baies : échantillonnage rigoureux à réaliser. TAVP : Rapport théorique et non réel de transformation du sucre en alcool.
Acidité Totale (AT)	Important pour l'équilibre organoleptique du vin ; Impliqué dans la stabilité du vin ;	Augmentation de l'AT lors de la phase herbacée. Diminution à partir de la véraison. Evolution inverse au pH.	Représente la quantité d'acides organiques. Vue globale, ne reflète pas l'évolution des différents acides.
Acide malique	Important pour l'équilibre organoleptique et la stabilité du vin ; Impliqué dans la FML.	Diminution lors de la seconde phase de maturation. Témoigne du chargement en sucre. Impliqué dans la production énergétique cellulaire.	Diminution observée pouvant résulter de la dégradation par le soleil (régulation thermique des feuilles) et non de la dégradation cellulaire liée au chargement des sucres.
pH	Important pour l'équilibre organoleptique et la stabilité du vin ; Impact sur la fermentescibilité des mouts ; Impact sur l'action du SO ₂ .	Augmentation au cours de la maturation. Evolution inverse à l'AT. Représente l'acidité réelle.	Evolution non proportionnelle aux variations des acides organiques seuls.
Azote assimilable (Nass)	Impact sur la fermentescibilité des mouts ;	Diminution au cours de maturation.	Cinétique d'évolution de l'azote pouvant être faussé par l'apport exogène.

(Réalisation personnelle)

Troisièmement, les suivis de l'acidité totale (AT), de l'acide malique et du pH sont importants car ces paramètres jouent un rôle dans l'équilibre gustatif du vin et sa stabilité. Durant la phase herbacée, la teneur en acides organiques, tels que le tartrique et malique, augmente et entraîne une hausse de l'acidité totale. Cependant, lors de la seconde phase de maturation, le niveau d'acide tartrique reste relativement constant mais l'accumulation d'eau entraîne sa dilution. Tandis que l'acide malique est dégradé de façon importante par le biais de la respiration cellulaire, Figure 15, afin de fournir l'énergie nécessaire à l'accumulation des sucres. Ces changements induisent une diminution globale de l'acidité totale et une augmentation du pH. Ainsi, le suivi de l'acide malique est un indicateur physiologique pertinent pour caractériser et suivre la maturation du raisin, car la simple mesure de l'AT ne permet pas de refléter les variations individuelles des différents acides. Par ailleurs, le suivi du pH est également complémentaire à celui de l'acidité totale, car il permet d'évaluer la fermentescibilité des moûts, la stabilité de la couleur et l'efficacité du SO_2 . À l'inverse de l'AT, le pH augmente au cours de la maturation, influençant ainsi divers aspects du processus de vinification.

Quatrièmement, le suivi des substances azotées est essentiel car ces molécules sont des régulateurs de croissance impliqués dans le développement de la baie et dans les réactions de la vigne face aux agressions parasitaires. Ces composés jouent également un rôle clé dans la nutrition des levures et par conséquent dans le déroulé de la FA et la synthèse aromatique à partir des acides aminés azotés (Swiegers et al., 2005). Le suivi de l'azote assimilable par les levures (Nass ou YAN) regroupe l'azote ammoniacal (cation ammonium NH_4^+) et l'azote aminé. Ces composés s'accumulent dans la baie puis lors de la maturation pour atteindre des valeurs de l'ordre de la centaine de mg/L. Dans la littérature il a été établi qu'un YAN de 140mg/L est suffisant pour la fermentation d'un moût de 12%vol. de TAVP (Verdenal et al., 2021). Cinquièmement, bien que responsables de l'astringence et impliqués dans la stabilité oxydative des vins, les composés phénoliques sont très peu analysés dans les baies de raisins blancs. La synthèse des acides phénols est importante dès l'anthèse puis diminue et se stabilise au cours de la maturation. Quant à eux, les flavonoïdes sont synthétisés à partir de la phénylalanine dès la nouaison. Lors de la véraison, un pic d'expression des gènes codant pour des enzymes impliquées dans la voie métabolique crée une augmentation de leur synthèse et différenciation lors de la seconde phase de maturation. Globalement, la concentration en composé phénolique augmente lors de la phase herbacée puis se stabilise au cours de la seconde phase de maturation (Romeyer et al., 1983). Par ailleurs, des études ont permis d'observer une modification de la localisation des composés phénoliques dans la baie ainsi qu'une augmentation de leur extractibilité au cours de la maturation. Cependant ces modifications biochimiques ne sont pas encore bien comprises (Allegro et al., 2016).

Enfin, le suivi chimique des précurseurs et des composés aromatiques est également peu réalisé lors de la maturation. Généralement sous formes libres ou sous formes de glycosides dans la baie, les molécules aromatiques sont ensuite libérées par hydrolyses enzymatiques ou chimiques lors de la vinification. Dans la baie, différentes études ont mis en évidence les cinétiques d'accumulation et de dégradation de ces molécules au cours de la maturation. Les arômes variétaux du Chardonnay, comme les terpènes, les caroténoïdes, les thiols et les précurseurs d'arômes sont synthétisés dès la nouaison. Ensuite, les taux des terpènes et des thiols augmentent tout au long de la maturation (Gunata et al., 1985; Luo et al., 2019b). Tandis que les méthoxypyrazines, responsables de notes herbacées négatives, sont photo-thermosensibles et dégradées par le soleil (Bottez et al., 2016; Lacey et al., 1991). Tout comme, les acides gras glycosylés impliqués dans la formation d'alcools et d'aldéhydes à 6 carbones responsables de notes herbacées voient leur concentration diminuer au cours de la maturation.

Tableau 7 : Exemples de méthodes d'évaluations des paramètres de la maturité.

Paramètres	Méthode	Matériel	Principe	Intérêts	Limites
Evaluation globale	Sensorielle		Dégustation des baies. Appréciation de la qualité des tanins, des saveurs, des arômes libres.	Travail collaboratif. Evaluation globale.	Destructif. Subjectif. Beaucoup de composés non perceptibles.
Sucre, AT, Acide malique, pH, Azote assimilable	IRTF	Spectrophotomètre avec interféromètre de Michelson. ex: WineScan FOSS ex: Spectron Pellenc	Mesure spectrale dans la zone 1000 à 10 000 cm^{-1} . Le spectre IRTF identifie les différentes liaisons chimiques des composés organiques. L'interprétation quantitative et qualitative du spectre repose sur une approche purement mathématique et statistique, basée sur l'application de modèle obtenus avec des données introduites au cours d'une phase d'apprentissage du système.	Source IR polychromatique. Pas de préparation de l'échantillon, rapide.	Nécessite une base de données importante afin de comparer les spectres, étalonnage. Limite de détection haute pour certaines paramètres (acide malique).
Sucre, TAVP	Réfractométrie	Réfractomètre ABBE ou lunette portative	Mesure de l'indice de réfraction de l'échantillon : un rayon lumineux change de direction en fonction de sa vitesse de propagation dans le milieu qu'il rencontre. Plus l'échantillon est concentré en soluté, plus la déviation/réfraction est importante. Le réfractomètre permet de mesurer l'angle de déviation de la lumière ayant traversé l'échantillon, en le projetant sur une échelle. La teneur en soluté de l'échantillon peut alors être calculée.	Rapide, correction de température, simple d'utilisation	Ne peut pas être utilisé sur des mouts en fermentation. Faible précision, car dépend des conditions de luminosité et de la sensibilité de l'utilisateur.
Sucre, AT, Acide malique, Azote assimilable	Colorimétrie par méthode enzymatique	Séquentiel, kits enzymatiques, spectromètre UV-vis.	Dosage enzymatique suivi d'une mesure au spectromètre UV-vis : - Sucre : Dosage successif du Glucose puis du Fructose basé sur la mesure spectrophotométrique du NADPH formé par les réactions combinées de l'Hexokinase, de la PhosphoGlucosomérase et la Glucose-6-phosphate déshydrogénase. Dosage à 340nm. - AT : L'échantillon est mélangé à un tampon, la concentration en ions H^+ augmente et l'indicateur change de couleur. Cette coloration varie de façon parabolique avec la concentration en ions H^+ . Dosage à 620nm. - Acide malique : Basée sur la mesure spectrophotométrique du NADH formé par les réactions combinées de la L-malate déshydrogénase et la Glutamate Oxaloacétate transaminase. Mesure à 340nm. - Azote assimilable = Azote α -aminé (1) + Azote ammoniacal (2) : (1) Les groupements amine primaire sont dérivés par la o-phthaldialdéhyde et la n-acétyl cystéine pour former des isoindoles. Ces isoindoles forment un complexe stable dont l'intensité de couleur est proportionnelle à la concentration en azote α -aminé. (2) L'azote ammoniacal est déterminé par sur la mesure du NADH consommé par la réaction de la Glutamate déshydrogénase.	Utilisation sur automate séquentiel possible. Rapide.	Sensibilité de détection de certains composés. Stabilité des réactifs. Possible préparation des échantillons.
Acidité totale	Titrimétrie couplée à la pH-métrie.	pH-mètre, indicateur coloré, solutions chimiques	Somme des acidités titrables lorsqu'on amène le pH à 7 par addition d'une solution alcaline titrée. Mesure en présence d'un indicateur coloré qui permet de repérer le point d'équivalence de la réaction chimique à pH 7, ou titration sans témoin coloré à l'aide d'un pH-mètre.	Méthode avec pH-mètre plus précise que la détermination avec témoin coloré.	Estimation visuelle de la couleur parfois difficile, même avec un témoin.
Indice sur la maturité aromatique et phénolique	Electrochimie / Voltamétrie	ex: Polyscan Nomasens	Voltamétrie linéaire à balayage : Enregistrer l'intensité du courant émis lors de réaction d'oxydation, induite par l'application de potentiels de plus en plus élevés à l'interface d'une électrode au contact du mout.	Adapté à tous les cépages, rapide, en temps-réel	Nécessite une base de données importante.
Maturité phénolique	Fluorescence	Fluorimètre ex: Multiplex Force A	Excitation des molécules avec lumière d'une longueur d'onde spécifique puis collecte du spectre d'absorption et d'émission. Le traitement mathématique des spectres obtenus permet de calculer la teneur en composés phénoliques.	Non destructif, rapide.	Onéreux.
Maturité phénolique	Méthode Glories (Saint Cricq de Gaulejac et al., 1998), ITV, CASV, AWRI, Cromoenos		Dosage des anthocyanes (pour cépages noirs) et des tanins. Méthodes qui reposent généralement sur l'extraction des composés suivis de mesure des DO280 et détermination des concentrations par le calcul.	Plutôt rapide, assez précis.	Méthodes destructives, difficultés d'interprétation.

A l'inverse, l'augmentation d'ensoleillement induit également une dégradation des β -carotènes libres au profit de la synthèse des C13-norisoprénoides glycoconjugués tels que la β -damascénone et le TDN (Deloire et al., 2020; Enzell, 1985; López et al., s. d.; Marais et al., 1991; Yuan & Qian, 2016). Par ailleurs, de récentes études ont montrées que la maturation semblerait les réactions entre les composés phénoliques et les aldéhydes, même si les mécanismes ne sont pas bien établis. De plus, une autre constatation est que la concentration d'acétaldéhyde semble diminuée dans les vins produits à partir des raisins jugés plus mûrs. Cette découverte est importante, compte tenu de la contribution de l'acétaldéhyde au caractère sensoriel d'un vin et de son rôle dans le potentiel de vieillissement (Arias-Pérez et al., 2020; Ferrero-del-Teso et al., 2020).

3. La maturité et son impact sur la composition du moût et du vin

De nombreux facteurs tels que le génotype et les conditions météorologiques peuvent affecter le métabolisme de la vigne. Cela a un impact direct sur la composition des baies de raisins à la récolte. Ainsi, pour suivre l'évolution des différents composés et choisir la date de récolte optimale, selon le profil du vin souhaité, plusieurs types de maturités ont été établis.

Tout d'abord, la maturité technologique, qui est déterminée par la concentration en sucre et l'acidité totale. Le taux de sucre augmente progressivement et jusqu'à atteindre un plateau d'accumulation maximal. A l'inverse, l'acidité tend à diminuer au cours de la maturation. A noter que, des températures fraîches retardent la maturation avec une accumulation lente de sucre et une préservation de l'acidité. Des températures trop basses peuvent cependant contraindre les baies à atteindre un niveau de maturité technologique suffisant. A l'inverse, des températures élevées accélèrent l'accumulation des sucres et la dégradation de l'acide malique. De plus, un ensoleillement trop important peut rompre l'intégrité de la baie et provoquer des nécroses favorables au brunissement des moûts (Blancard & Deluche, 2018). Ces coups de soleils, couplés à des épisodes de sécheresse, impactent la photosynthèse et par conséquent la qualité globale des raisins. Ces excès entraînent une forte dégradation des acides organiques et notamment de l'acide malique, un flétrissement de la baie et une diminution des rendements en jus. D'ailleurs, ces tendances sont de plus en plus observées avec le réchauffement climatique (Barriault et al., 2018; van Leeuwen et al., 2016).

Ensuite, la maturité phénolique, qui n'est pas nécessairement corrélée avec la maturité technologique. Ce type de maturité permet d'évaluer la structure tannique et d'estimer la quantité et la qualité des tanins présents dans la baie. Le suivi phénolique est généralement réservé aux cépages noirs.

En outre, la maturité aromatique, qui n'est pas synchronisée avec la maturité technologique et phénolique. La maturité aromatique correspond à une concentration optimale en précurseurs ou composés d'arômes positifs et une faible concentration d'arômes indésirables. Plusieurs études ont essayé de déterminer des corrélations entre la maturité technologique et le profil aromatique du vin. Avec une première phase caractérisée par des profils sur les fruits frais et les fleurs, puis une secondes phases sur les fruits plutôt mûrs, cuits ou compotés (Escudero et al., 2019; Fang & Qian, 2006). L'existence d'une séquence aromatique au cours de la maturation a été mise en évidence pour les cépages noirs, cependant la transposition pour les cépages blancs reste hypothétique.

Enfin, les raisins sont alors récoltés à maturité œnologique, correspondant à un compromis entre les 3 sous-types de maturité. La maturité œnologique est cépage dépendante. D'après la littérature, pour le Chardonnay, elle est atteinte entre 95 et 106 jours après la fleur (Romieu, 2024).

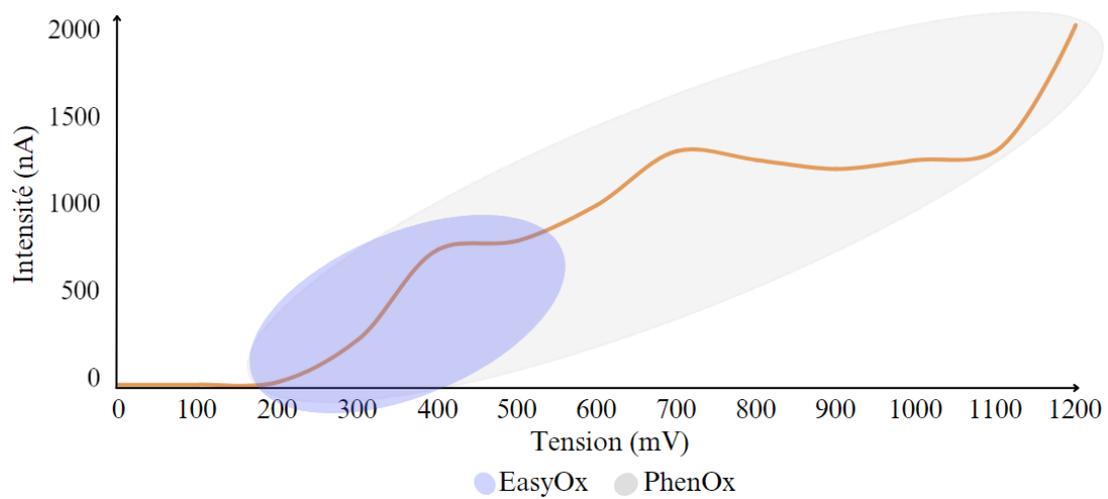


Figure 17 : Exemple de voltamogramme obtenu à l'aide du PolyScan, et représentation des indices EasyOx et PhenOx.
(Réalisation personnelle à partir de (Pascal, 2020))

4. Les méthodes d'évaluation des paramètres de la maturité

Différentes techniques d'évaluation des paramètres de la maturité existent. Quelques exemples sont récapitulés Tableau 7.

D. Nouvel outil de mesure : développement et validation de la méthode

Plusieurs études ont essayé de caractériser plus finement la maturation en analysant d'autres paramètres biochimiques tels que l'expression génique lors de la dernière phase de maturation, afin d'obtenir de nouveaux indicateurs de la maturité (Ferreira et al., 2017; Guillaumie et al., 2011). Dans cette même dynamique, de nouveaux outils ont été développés afin de caractériser différents aspects de la maturité ou encore d'évaluer la sensibilité du vin à l'oxydation. Ces outils d'accompagnement ont une utilisation facile et rapide permettant d'obtenir des résultats en temps-réel interprétable par l'utilisateur. Parmi ces dernières innovations, le Polyscan, permet d'analyser la capacité du vin à réduire l'oxygène mais aussi d'évaluer la maturité phénolique et aromatique des baies.

1. Le Nomasens PolyScan

a) Développement et principe de l'appareil

Depuis 2012, la société Vinventions commercialise le PolyScan, un outil permettant d'analyser les composés oxydables du vin grâce à une technique électrochimique : la voltammétrie linéaire de balayage. Initialement utilisée en médecine et en biologie (Chevion et al., 1999; Kohen et al., 2000; Sochor et al., 2013), la voltammétrie a ensuite été appliquée à la matrice vin (Chiorcea-Paquim et al., 2020; Ugliano, 2016). Grâce à des électrodes de carbone sérigraphiées jetables, la voltammétrie permet d'analyser la composition phénolique du vin et d'identifier rapidement sa fraction oxydable (Avramescu et al., 2002; Hapiot et al., 1996; Lunte et al., 1988). Cette méthode implique l'utilisation de trois électrodes : une électrode de travail, une électrode de référence et une contre électrode, toutes au contact de l'échantillon à analyser. Lors de l'analyse des tensions croissantes allant de 0 à 1200 mV sont imposées à l'échantillon. A chaque pas de tensions, différents composés sont oxydés, libérant des électrons qui génèrent un courant. L'intensité générée par cette oxydation est transcrite sous forme de voltamogramme, Figure 17. Chaque segment de la courbe obtenue correspond aux différents composés oxydables présents dans l'échantillon. Le classement des composés en fonction des potentiels auxquels ils s'oxydent permet de déterminer la fraction de composés les plus facilement oxydables parmi tous les composés oxydés lors de la l'analyse. Ainsi, l'étude du voltamogramme permet de générer des indices caractérisant le vin (Chiesa, 2020; Infowine, 2021; Pascal et al., 2020).

b) Les indices mesurés

L'ensemble des mesures acquises sur les différents Polyscan sont anonymes et centralisées, afin de constituer une base de données cépage-dépendante conséquente. Cette banque de données permet d'ajuster continuellement les valeurs des indices obtenus. Les 4 indices pouvant être mesurés sont :

- (1) L'indice PhenOx, Figure 17, qui renseigne sur la teneur en composés phénoliques totaux (en mg/L équivalent acide gallique) et est basé sur l'indice de Folin Ciocalteu (Singleton & Rossi, 1965).
- (2) L'indice EasyOx, Figure 17, qui correspond à la fraction de composés facilement oxydables.
- (3) La tendance d'évolution (TE) qui permet d'évaluer la sensibilité d'un vin vis-à-vis de l'oxydation, au moment du test en reproduisant le test de stabilité à l'air.

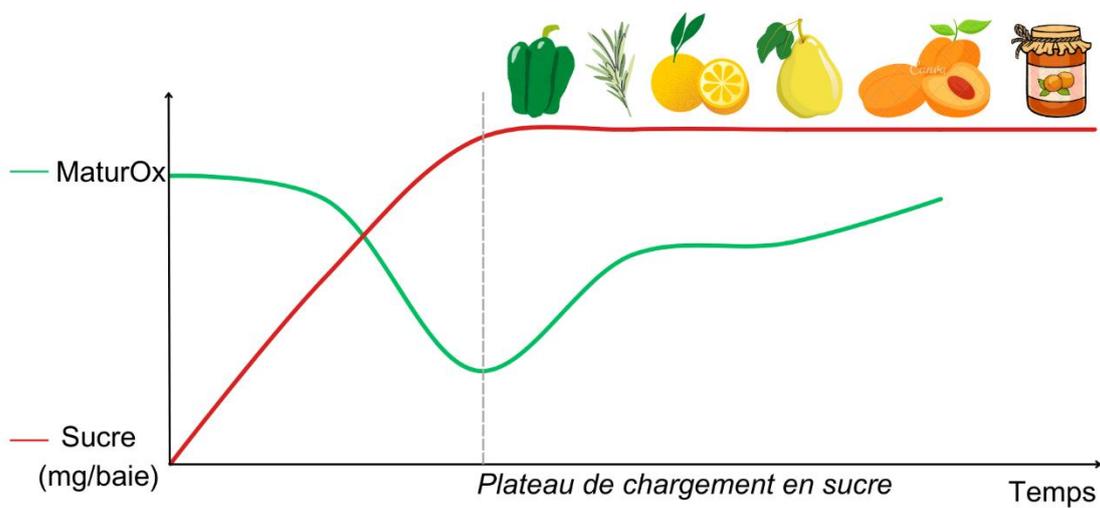


Figure 18 : Représentation de l'évolution du chargement en sucre de la baie, de l'évolution de l'indice MaturOx au cours du temps et des séquences aromatiques hypothétiques associées. (Réalisation personnelle à partir de (Vinventions, 2024))

(4) Le MaturOx, qui est basé sur l'évolution de la teneur en composés oxydables au cours de la maturation. Il a été mis en évidence qu'un minimum de signal voltamétrique est observé au moment de l'arrêt de chargement en sucre, Figure 18. L'indice MaturOx a été développé afin de prédire des fenêtres de dates de vendanges correspondant aux différents profils aromatiques théoriques (Antalick et al., 2021; Deloire, 2011, 2012; Deloire et al., 2017).

2. Validation interne de la méthode

A ce jour, il n'existe pas de méthode de référence, dans le recueil de l'OIV, concernant la voltammétrie, quel que soit le paramètre œnologique évalué (OIV, 2023). Par conséquent, une procédure de validation de la méthode permet de confirmer, par des preuves tangibles, que celle-ci répond aux exigences de l'usage auquel elle est destinée.

D'après la littérature, la validation d'une méthode peut prendre différentes formes selon les domaines concernés mais les principes et outils restent similaires. La validation a pour objectifs principaux d'évaluer les performances de la méthode, le fonctionnement du matériel et la fiabilité des résultats obtenus (ISO/IEC 17025, 2017; ISO 5725-1, 2023; Vidal, 2006). Pour cela, l'étude d'un ensemble de paramètres doit être réalisée.

Premièrement la fidélité, qui permet de s'assurer de l'étroitesse de l'accord entre les résultats d'essais obtenus à partir d'un échantillon homogène dans des conditions établies. La fidélité regroupe la répétabilité, la fidélité intermédiaire et la reproductibilité. La répétabilité se rapporte à une répétition des essais effectués dans des conditions aussi stables que possible (même laboratoire, opérateur et équipement). La fidélité intermédiaire mesure la capacité de la méthode à générer les mêmes résultats, de manière répétée, dans un même laboratoire avec des conditions différentes, en faisant varier au moins un facteur (opérateur ou équipement). La reproductibilité mesure la variation des résultats lorsque les essais sont réalisés dans des conditions différentes (opérateur et équipement).

Deuxièmement, la robustesse, en relation avec la sensibilité du matériel aux perturbations extérieures, qui permet d'évaluer la variation induite par chaque paramètre. En effet, la méthode doit être capable de maintenir ses performances lorsqu'elle est soumise à des petites variations fortuites des conditions expérimentales (autre opérateur, autre équipement, autre site).

Troisièmement, la justesse, qui permet d'évaluer l'accord de la valeur obtenue avec la valeur vraie en comparaison avec une méthode de référence. Enfin, d'autres paramètres tels que la spécificité, la linéarité, la sensibilité et les incertitudes sont également évalués afin de valider la méthode.

En général, le processus de validation d'une méthode est réalisé avant commercialisation de l'outil l'utilisant. Néanmoins, il est intéressant de vérifier en interne, l'adéquation de celle-ci.

Pour valider la méthode en interne, une approche comparative est possible. Elle consiste à comparer directement la méthode à une méthode analogue déjà validée qui exprime avec exactitude les grandeurs ou les propriétés recherchées. Cependant, en l'absence de méthode de référence, une autre approche peut être utilisée afin d'obtenir des preuves de conformité. Avec par exemple, une démonstration par des calculs mathématiques ou par des vérifications expérimentales apportant des preuves de répétabilité et reproductibilité. Dans le cas de l'approche expérimentale, il suffit d'identifier les facteurs d'influences clés et de les faire varier un par un, tout en maintenant les autres facteurs fixes. Ainsi en provoquant simultanément les facteurs susceptibles de modifier les résultats, il est possible d'observer leurs effets et leurs interactions. Cela permet de vérifier, à l'aide d'outils statistiques, que la somme de toutes les variables sur le résultat final obtenus reste dans la marge d'incertitude de la méthode. Une telle approche ne permet pas de vérifier la justesse, la linéarité ou encore la sensibilité. Cependant elle permet de fournir suffisamment d'informations pour attester de la conformité de la méthode pour une utilisation de routine.

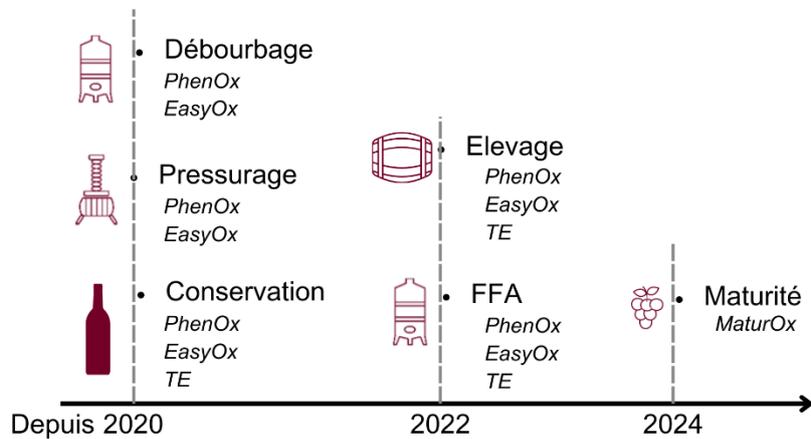


Figure 19 : Indices mesurés à l'aide du Polyscan aux différentes étapes de l'itinéraire technique. (Réalisation personnelle)

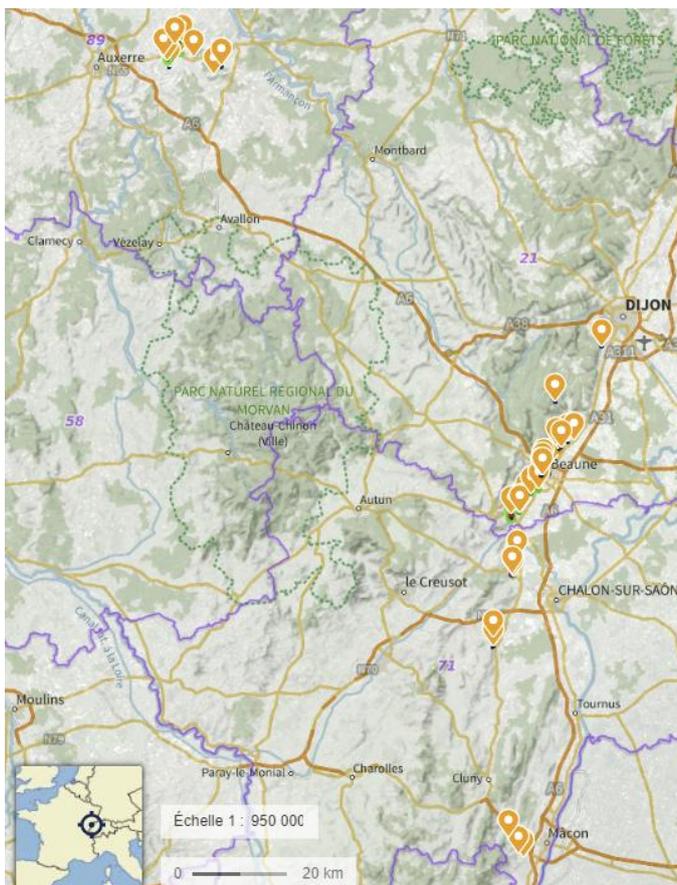


Figure 20 : Répartition géographique des 40 parcelles d'études. (Réalisation personnelle sur Géoportail.gouv.fr)



Figure 21 : Exemple de sélection des rangs au sein d'une parcelle. (Réalisation personnelle sur Géoportail.gouv.fr)

II. MATERIELS ET METHODES

A. Mise en place et animation d'un réseau partenaire

Le réseau VOLTA a été constitué en 2020, sur la base du volontariat. Il est composé de 33 membres dont 23 vignerons, 4 caves coopératives et 6 maisons de négoce, situés dans toute la Bourgogne. L'animation du réseau se fait par le biais de séminaires ou d'échanges directs mais également par l'envoi de newsletters chaque semaine. Ainsi, chaque membre a été contacté et rencontré afin d'échanger sur le projet et la mise en place d'un essai maturité lors des vendanges 2024.

B. Prises d'échantillons et réalisation des mesures à l'aide du Polyscan

1. En cave : aux différentes étapes de la vinification

Depuis 2020, les indices PhenOx, EasyOx et TE ont été analysés à l'aide du Polyscan aux différentes étapes de l'itinéraire technique, Figure 19. Ainsi, plus de 3000 mesures ont déjà été réalisées.

a) Mesure du PhenOx et EasyOx lors du pressurage

Pour chaque cycle de pressurage, une quinzaine de mesures ont été réalisées. Une mesure a été effectuée sur les jus de goutte, lors du lancement du pressoir, puis à chaque montée en pression ou changement de palier. Pour cela, un échantillon de jus a été prélevé directement à la tombée de la cage ou le cas échéant à la maie, à l'aide d'un bécher. Ensuite l'échantillon a été analysé avec le menu analytique « pressurage » du Polyscan.

b) Mesure du PhenOx et EasyOx à la fin du débourbage

Les échantillons ont été prélevés une fois le débourbage terminé, mais avant soutirage des bourbes, levurage ou départ en fermentation. Pour cela, le jus clair (débourbé) a été prélevé dans la cuve de débourbage au niveau du robinet de dégustation à l'aide d'un bécher. Ensuite l'échantillon a été analysé avec le menu analytique « cuve de débourbage » du Polyscan.

c) Mesure du TE à la fin de la fermentation alcoolique (FFA)

La mesure du TE à la fin de la fermentation alcoolique a été réalisée une fois que le sucre dans le vin ait atteint une concentration inférieure à 3g/L. Pour cela, 50mL de vin ont été prélevés à l'aide d'une pipette jaugée double trait. Une goutte de cet échantillon a été directement analysé avec le menu analytique « orientation fin FA » du Polyscan, et le reste de l'échantillon prélevé a été conservé à température ambiante dans un flacon fermé. Après 2 heures d'attente, une goutte de cet échantillon a été de nouveau analysé à l'aide du même menu analytique du Polyscan.

Les protocoles de prise d'échantillon pour les étapes du pressurage, débourbage, fin de fermentation alcoolique (FFA), et élevage (ELV) ont été établis lors de précédents travaux (Panigai, 2020) et sont résumés en Annexe 2. Les mesures sont, à ce jour, toujours réalisées de la sorte. Les modes opératoires sont également consultables dans le guide d'utilisation du Polyscan (Vinventions, 2024). L'interprétation des résultats a été réalisée comme expliquée dans les différentes brochures de communication du BIVB (BIVB, 2020, 2022b) et de Vinventions (Brenon et al., 2024).

Tableau 8 : Informations des parcelles d'études sélectionnées.

Secteur	Identification	Surface (ha)	Age (ans)	Type de sol	Exposition
Mâconnais	Pouilly Fuissé PC - Les Reisses	0,25	60	Rendosol, limono-argileux sur calcaires et marnes.	NE
	Pouilly Fuissé - Les Scélés	0,31	50	Alocrisol, sol acide issu de schistes.	NE
	Pouilly Fuissé - Terres du Perret	0,38	35 - 50	Rendosol, dépôt de pente très caillouteux sur marnes.	N
Côte Chalonnaise	Montagny PC - Clos du corbeau			Calcosol.	SE
	Montagny - Sous l'église 1101			Calcosol.	
	Montagny - Sous l'église 1102			Calcosol.	
	Mercurey PC – La Mission	1,92	35 à 60	Rendosol Caillouteux et argilo calcaire.	S
	Mercurey – En Pierrelet	2,96	34	Rendosol. Caillouteux et argileux.	E
	Rully - Villerranges	1,18	37	Calcaires argileux. Rendosol.	E
Côte de Beaune	Chassagne - En Pimont	2,97	50	Lithosol, Argilo-calcaire.	SE
	Puligny PC - Le Clavoillon	1,17	40-45	Calcosol-Calcosol sur formation alluvio-colluviale.	SE
	Puligny PC - Les Pucelles	0,30	66	Rendosol, argilo calcaire.	SE
	Puligny - Les Meix	0,22	61	Rendosol. Argile (40%), limons fins (20 %) et quelques sables grossiers.	NE
	Puligny - La rue aux vaches	0,09	74	Rendosol, argile lourde, calcaire.	SE
	Meursault	0,60		Rendosol.	NE
	Meursault - Les crotos	0,14	34	Rendosol, argilo-calcaire.	E
	Volnay - Grandes Terres	0,34	33	Brunisol, argileux.	NE
	Beaune PC - Clos des mouches 10ouvrées	0,44	13	Rendosol, limons argilo-sableux.	SE
	Beaune PC - Clos des mouches Grand Berod	1,40	24-30	Rendosol, limons argilo-sableux.	SE
	Beaune - Montée rouge	0,39		Calcosol.	SE
	Beaune - Les monnières	0,40		Calcosol.	NE
	Beaune - Les grèves bas	0,80	64	Rendosol, argilo-calcaire.	SE
	Pernand PC - En caradeux	0,53		Calcosol.	SE
	Côte de Nuits	Ladoix Village 2013	2,24	11	Rendosol. Marnes sableuses.
GC Corton Charlemagne		0,40		Rendosol.	NE
GC Corton Charlemagne - Les languettes		0,29	23	Rendosol, argilo-limoneux.	SE
Côte de Nuits	Corgoloin - Le Clos des Langres	0,12	20	Rendosol, brun calcaire, sur calcaires organodétritiques du Bathonien terminal et du Callovien. Faciès "dalle nacrée".	SE
	HCN - Ladoix - La Quarpande Marsannay	0,27	9	Calcosol argilo-calcaire.	SE
Chablisien	Chablis GC - Bougros	0,52	61	Kimméridgien.	NE
	Chablis PC - Vaillons	2,77	44	Kimméridgien à dominante argileuse.	SE
	Chablis - Les fontenilles	1,65	25-30	Calcosol.	SE
	Chablis - Les sourdelles	0,35	30	Rendosol, peu profond sur dalle dure de roche mère.	E
	Petit Chablis - Les usages	1,53	25-30	Argilo-calcaire très caillouteux.	SE
	Petit Chablis - Champs rond	6,00	40-45	Limoneux-argilo-calcaire.	SE
	Chablis - Chaude écuelle	1,13	40-45		NE
	Chablis - Boissonneuse			Kimméridgien.	SE
	Chablis PC Vau de Vey				E
	Chablis PC Fourchaume			Alluvions.	E
Chablis – Montée de Tonnerre				SE	

2. À la parcelle : contrôle maturité

a) Sélection des parcelles d'études

Pour l'étude portant sur le suivi maturité, 19 membres du réseau ont accepté de participer, représentant 3 coopérateurs, 6 négociants et 10 vignerons. Au total, 40 parcelles de Chardonnay Blanc ont été sélectionnées, Figure 20 et Tableau 8, dont 9 localisées en Saône et Loire, 20 en Côte d'Or et 11 dans l'Yonne.

Les parcelles ont été choisies afin de représenter au maximum l'hétérogénéité de la Bourgogne, avec une diversité de sols, de climats, de niveau d'appellation et de mode de conduite. Dans chaque parcelle, une micro-parcelle d'étude de 10 rangs a été délimitée, Figure 21. La sélection des 10 rangs a été raisonnée en fonction de l'homogénéité de la parcelle en termes de matériel végétal et de caractéristique du sol. Des micro-parcelles d'études ont été exclus les rangs de garde, les pointes ainsi que les pieds de bout de rang.

b) Collecte et analyse des échantillons

Pour chaque parcelle d'étude, les prélèvements ont été réalisés de la mi-véraison, soit quand 50% des baies sont verrées, et jusqu'à la récolte. Un prélèvement hebdomadaire de 200 baies a été réalisé selon les recommandations de l'OIV.

Pour cela, les baies ont été collectées individuellement et de manière « aléatoire » sur les grappes situées au niveau du cordon. Lors du prélèvement, une légère rotation des baies sur elles-mêmes a été réalisée permettant de les décrocher du reste de la grappe tout en conservant leur intégrité. De plus, une alternance des prélèvements des baies situées sur la face ombre et soleil ainsi qu'en position haute et basse dans la grappe a été respecté. Cela a permis d'obtenir des échantillons les plus représentatifs possibles, tout en tenant compte de l'hétérogénéité des niveaux de maturités des baies. Ensuite, les baies ont été recueillies dans des sachets hermétiques identifiés, puis transportées dans une glacière maintenue à 15°C, avant d'être analysées.

Après avoir été pesées, les 200 baies ont été foulées à la main au travers du sachet maintenu fermé. Une fois toutes les baies écrasées, une goutte du jus a été déposée sur l'électrode du Polyscan, afin de réaliser la mesure de l'indice MaturOx à l'aide du menu analytique « suivi maturation », Annexe 3.

C. Réalisation d'analyses complémentaires

1. Analyse de suivi maturité au laboratoire d'analyse

A partir des baies collectées, les jus ont été extraits puis analysés par le Centre Oenologique de Bourgogne (COEB). Les paramètres tels que le sucre, l'acidité totale, le pH, l'acide malique et l'azote assimilable ont été analysés et dosés selon les méthodes de référence ou rapide d'essai, décrites dans le recueil de l'OIV.

2. Analyses de marqueurs moléculaires

Plusieurs échantillons aux stades débouillage, FFA ont été envoyés à l'Université de Bordeaux afin d'analyser des composés aromatiques ainsi que des marqueurs moléculaires de l'évolution et de l'oxydation des vins. La méthode RPE a été utilisée pour doser les radicaux libres tandis que le méthional et le phénylacétaldéhyde ont été analysés par GC-MS (projet confidentiel nommé APOGEE). Dans un second temps, lors de l'élevage ces mêmes échantillons seront prélevés, envoyés et les mêmes composés seront analysés. Les résultats de ces analyses permettront de faire le lien et de mieux comprendre l'impact de la maturité sur le potentiel de longévité des vins.

D. Cas des sites « autonomes »

Plusieurs membres du réseau, notamment dans le Chablisien, ont été amenés à réaliser en autonomie le suivi maturité, les mesures en cuves de débouillage et au stade FFA. Pour cela, les sites dits autonomes ont été équipés d'un Polyscan et de l'ensemble du matériel nécessaire pour effectuer les mesures aux différents stades.

Sur chaque site, un opérateur a été formé au prélèvement et à la réalisation des mesures sur le Polyscan. De plus, les premiers prélèvements et mesures ont été réalisés en binôme pour chaque menu analytique utilisé et à chaque stade d'analyse (maturité, pressurage, débouillage, FFA, ELV). Des protocoles ainsi que des vidéos explicatives ont été réalisées et communiquées à l'ensemble des opérateurs. Enfin, chaque semaine, les résultats obtenus sur les sites autonomes ont été recueillis et centralisés.

E. Traitement des données : analyses statistiques

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel statistique R studio. Les évaluations ont été réalisées avec une marge d'erreur de 5% (seuil p-value 0,05). Différents tests ont été utilisés afin de traiter des jeux de données accumulées en 2020, 2021 et 2024.

Pour toutes les données, la normalité et l'homoscédasticité des données ont été évaluées à l'aide de test de Student et de Levene. Et pour plus de cohérence, des tests d'indépendance et de normalité des résidus ont également été effectués à l'aide de la régression linéaire. Ensuite, les données homogènes et suivant une loi normale ont été soumises à une analyse de la variance (Anova) suivi d'un test post-hoc de Tukey et d'un test de corrélation de Pearson. En cas de non homogénéité ou de non-respect de la loi normale, un test de Kruskal-Wallis a été effectué suivi d'un test de Dunn-Bonferroni, et des tests de corrélations de Kendall et Spearman.

Pour les données obtenues en 2024, en plus des analyses énoncées ci-dessus, une analyse multifactorielle à variables mixtes (FAMD) a été réalisée afin de visualiser les variables quantitatives et qualitatives. Un test de Wilcoxon a également été effectué afin d'analyser les différences entre les cinétiques d'évolution des paramètres de la maturité avant et après la date d'observation du minimum de MaturOx.

F. Conception du protocole expérimental pour validation de la méthode

Plusieurs membres du réseau ont été équipés d'un Polyscan puis formés à son utilisation pour l'ensemble des indices pouvant être mesurés. Ainsi ces sites ont procédé en autonomie aux différentes mesures du suivi maturité et des mesures aux autres étapes de la vinification (pressurage, débouillage, fin de FA et élevage). Afin d'évaluer l'éventuel impact de la réalisation des mesures par différents sites, une validation de la méthode a été réalisée par une approche expérimentale. L'influence de l'opérateur, ainsi que le temps entre le foulage et la mesure de l'indice MaturOx ont été étudiés. Pour cela, à partir d'un échantillon homogène les mesures du MaturOx ont été réalisées par deux opérateurs différents, LC et DB, et selon quatre modalités de temps entre la fin du foulage et le début de la mesure par l'appareil : 10s (T1), 90s (T2), 150s (T3) et 240s (T4). Pour chaque pas de temps, chaque opérateur a réalisé un triplicata. L'opérateur et le temps sont les facteurs d'essais, tandis que l'indice MaturOx correspond à la variable réponse.

Ensuite les données ont été traitées à l'aide du logiciel R Studio. Les données ont été vérifiées par un test de Student (Shapiro-Wilk) et de Levene. Une Anova a été réalisée afin d'identifier les différences significatives. Cette Anova a été complétée à l'aide d'un test de Tukey et de Pearson.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans un premier temps les données acquises en 2020 et 2021 sur la maturité, le pressurage et le débouillage ont été étudiées. Dans un second temps les données acquises en 2024, sur la maturité, ont été analysées.

A. Exploitation des données acquises en 2020 et 2021

En 2020, **les indices PhenOx ont été mesurés sur 950 échantillons suivis lors de 70 pressurages**. A l'aide de cet indice, les cinétiques d'extractions des composés phénoliques ont été observées. Ainsi, en fonction des indices obtenus et de leurs évolutions respectives au cours du cycle de pressurage, **3 catégories de pressoir ont été définies**.

Tout d'abord, la **catégorie n°1** représentée par **des forts PhenOx mesurés dès le début du pressurage** et qui se maintiennent tout au long du cycle, représentatif d'une forte extraction de composés phénoliques. Ensuite, la **catégorie n°2** caractérisée par de **faibles PhenOx tout au long du pressurage**, et par conséquent une faible extraction phénolique. Enfin, la **catégorie n°3** qui regroupe les pressoirs témoignant d'une forte **évolution de l'extraction** des composés phénoliques au cours du cycle et est caractérisée par une **augmentation de l'indice PhenOx**.

Pour chacune de ces 3 classes, **l'influences des pratiques et du niveau de maturité** des raisins au moment de la récolte ont été évalués. Plusieurs pratiques viticoles et vinicoles semblent conditionner l'extraction des composés phénoliques et prédisposer les jus obtenus à appartenir à une catégorie de pressoir en particulier. Par exemple, les jus classés dans la catégorie 3 étaient généralement issus d'une récolte mécanique tandis que ceux dans le groupe n°1 étaient majoritairement issus de raisins non protégés de l'oxydation, sans SO₂ ou sans inertage, avant et pendant le pressurage.

En outre, en 2020, parmi les échantillons suivis au pressurage, 35 avaient fait l'objet d'une analyse maturité au moment de la récolte. A partir des données collectées il avait été mis en évidence que les **raisins récoltés à maturité plus avancée**, soit avec des **TAVP plus élevés** que la moyenne de ceux analysés, été généralement **classés dans le groupe de pressoir n°3** (BIVB, 2020; Brenon et al., 2024; Panigai, 2020). Cependant, au niveau des paramètres de la maturité seules des analyses sur l'implication du TAVP sur les catégories de pressoirs avaient été menées. Depuis, les suivis de l'indice PhenOx lors du pressurage et les analyses maturité à la récolte ont été poursuivies. De ce fait, en 2024, l'ensemble des données accumulées grâce au réseau VOLTA ont été réanalysées. Un premier aperçu général a permis d'identifier les 3 mêmes catégories de pressoirs, pour tous les millésimes d'études, traduisant les mêmes cinétiques d'extraction des composés phénoliques. Dans un second temps, les influences de l'ensemble des paramètres de la maturité, soit le TAVP, l'acidité totale, le ratio sucre/acide (S/A) et le pH, sur la classification des pressoirs ont été investiguées. Aussi, des sous-groupes de TAVP, d'AT et de ratio S/A ont été réalisés afin de mieux traiter et visualiser les données.

1. Etude des paramètres de la maturité sur les catégories de pressoir

L'impact de chaque paramètre de la maturité sur les PhenOx mesurés ont été étudiés à chaque étape permettant de définir les catégories de pressoir. Pour cela, **une étude des paramètres de la maturité sur les PhenOx mesurés en début de pressurage** a été menée, suivie d'une seconde **analyse sur l'évolution des PhenOx au cours du cycle de pressurage**.

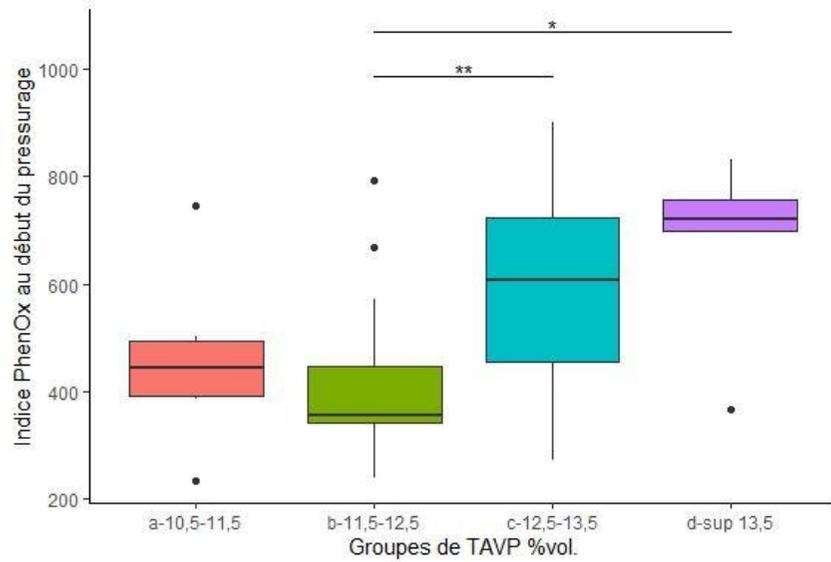


Figure 22: Indice PhenOx au début du pressurage en fonction des groupes de TAVP (%vol.)
p-value : *0,0194 **0,00185

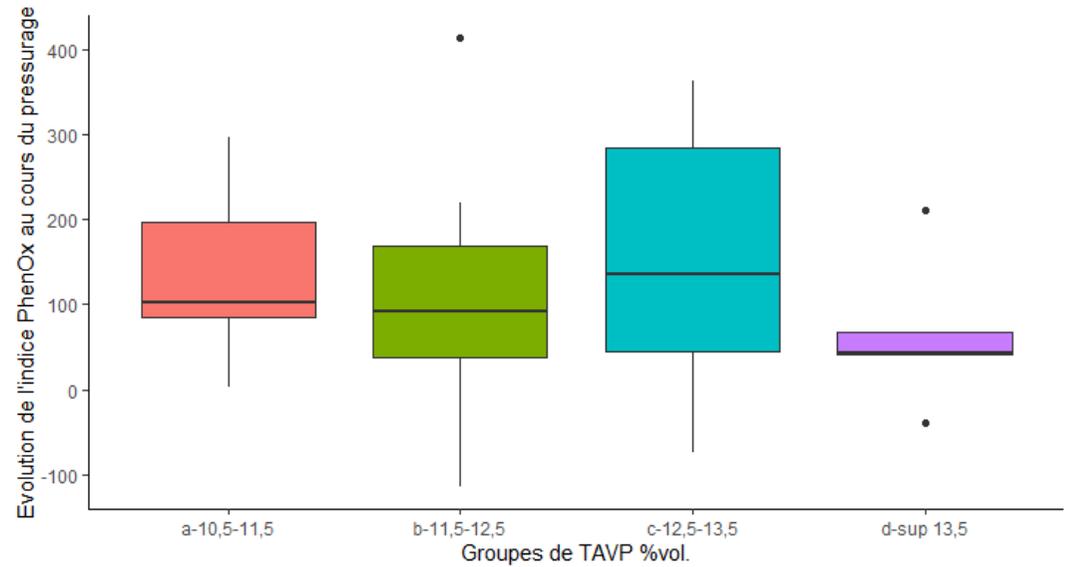


Figure 23 : Evolution de l'indice PhenOx au cours du pressurage en fonction des groupes de TAVP (%vol.).

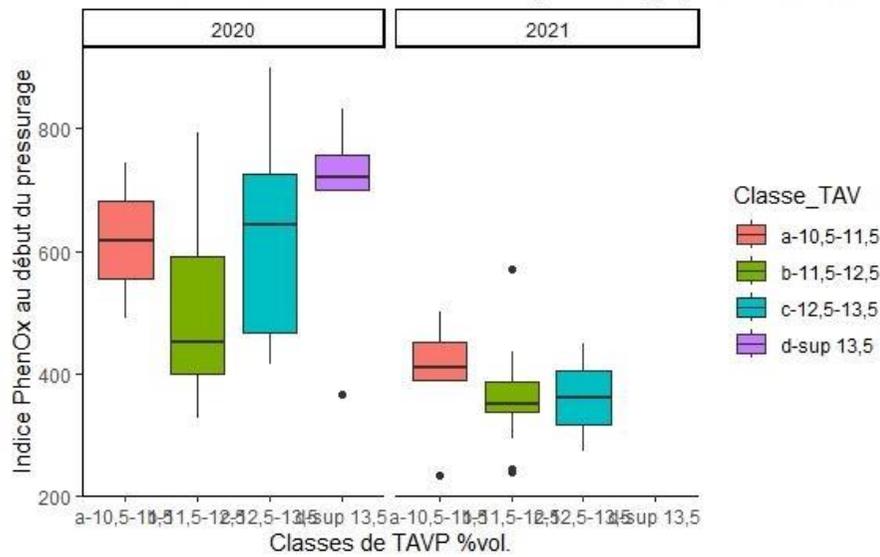


Figure 24 : Indice PhenOx au début du pressurage en fonction du TAVP (%vol.) et du millésime.

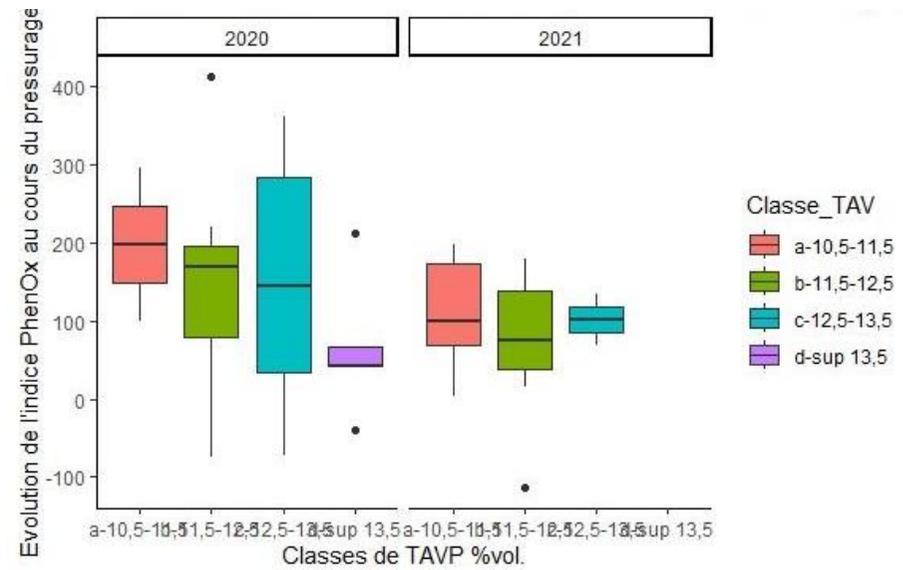


Figure 25 : Evolution de l'indice PhenOx au cours du pressurage en fonction du TAVP (%vol.) et du millésime.

Ensuite, afin de mieux comprendre les observations faites, une ségrégation des données par millésime a été réalisée. En effet, les **deux millésimes d'études, 2020 et 2021**, étaient drastiquement différents et la taille des échantillons n'était pas identique. En effet plus de la moitié des données ont été collectées en 2020, écrasant potentiellement les données de 2021 lors de l'observation globale.

Au total, **96 échantillons ont été suivis lors du pressurage et 56 ont fait l'objet d'une analyse maturité à la récolte**. Cette étude plus approfondie a permis de **mettre en évidence l'effet millésime** et de voir si certaines tendances observées de manière générale étaient retrouvées pour chaque millésime étudié séparément.

Tout d'abord, d'après les analyses statistiques, le **TAVP permet d'expliquer**, en partie, **l'appartenance des échantillons à certains groupes de pressoir** (Kruskal-Wallis p-value <0,05). Les échantillons avec des niveaux d'alcool probables plus élevés ont été retrouvés dans la catégorie de pressoir n°1. En regardant plus en détail, **le TAVP a joué un rôle sur les valeurs de PhenOx mesurées au début du pressurage** (Kruskal-Wallis p-value : 0,0007 <0,05), Figure 22, mais n'a eu **pas d'influence sur l'évolution de celui-ci au cours du cycle** de pressurage (Anova p-value : 0,296 >0,05), Figure 23. **Au début du pressurage**, Figure 22, **deux groupes** semblaient se distinguer, avec d'un côté un groupe avec des **PhenOx élevés pour des TAVP élevés >12,5% vol.**, et de l'autre côté, un groupe avec des **PhenOx faibles mesurés sur des jus avec des TAVP <12,5% vol.** et proche de 10%vol. Une comparaison des groupes de TAVP a permis de confirmer ces différences observées. En effet, les jus avec des TAVP entre 11,5 et 12,5%vol. avaient des valeurs de PhenOx significativement différentes des jus ayant un TAVP supérieur à 12,5% (Dunn-bonferroni p-value <0,05). Cependant, aucune différence significative n'a été observée pour les jus avec des TAVP inférieurs à 12,5%vol. (Dunn-bonferroni p-value >0,05). Ainsi, les PhenOx mesurés en début de pressurage étaient plutôt stables pour des jus avec des TAVP compris entre 10,5 et 12,5%vol. Et à l'inverse, au-delà de 12,5%vol. les variations de PhenOx observées étaient corrélées à l'augmentation des TAVP des jus étudiés (Kendall cor : 0,366 et Spearman cor : 0,53).

En discriminant selon le millésime d'études, Figure 24, des **différences ont été observées entre 2020 et 2021** (Kruskal-Wallis p-value : 0,00012 <0,05), avec notamment à **TAVP égal des PhenOx plus élevés en 2020 par rapport à 2021**, au début du pressurage. Cette différence traduit une plus forte extraction des composés phénoliques dès le début du pressurage. Cependant, au sein même d'un millésime d'étude aucune différence significative n'a été observée (Kruskal-Wallis p-value (2020) : 0,333 >0,05 et p-value (2021) : 0,445 >0,05).

Au niveau de l'évolution du PhenOx au cours du pressurage, les mêmes tendances ont été observées avec une différence entre les deux millésimes d'études (Anova p-value >0,05) mais pas au sein même d'un millésime (Anova p-value (2020) : 0,5 >0,05 et p-value (2021) : 0,618 >0,05), Figure 25. Cela montre l'importance de l'interprétation des données globales qui peuvent être erronées par l'effet du millésime expliquant les différences entre les tendances observées.

Par ailleurs, l'implication de **l'AT sur la répartition des échantillons par catégories de pressoir s'est également révélée significative** (Anova p-value : 0,0122 <0,05). De forte corrélation entre les niveaux d'AT et les catégories de pressoirs ont été mises en évidence. Pour des niveaux d'AT faible, les échantillons appartenaient à la catégorie de pressoir n°1 tandis que pour des valeurs d'AT élevée, les jus étudiés étaient associés à la classe de pressoir n°3 (Pearson cor : 0,38).

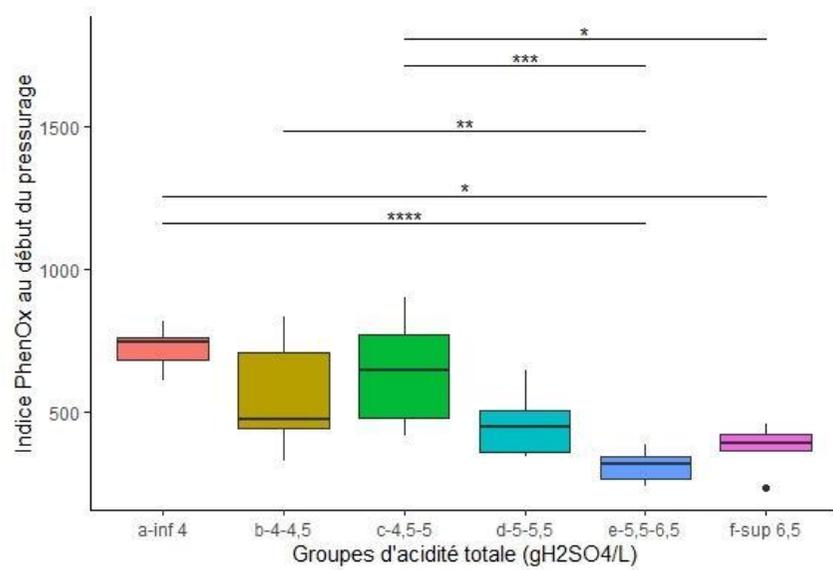


Figure 26 : Indice PhenOx au début du pressurage en fonction de l'acidité totale ($\text{gH}_2\text{SO}_4/\text{L}$).

* $1,92e^{-2}$; ** $:3,63e^{-3}$; **** $:4,58e^{-5}$

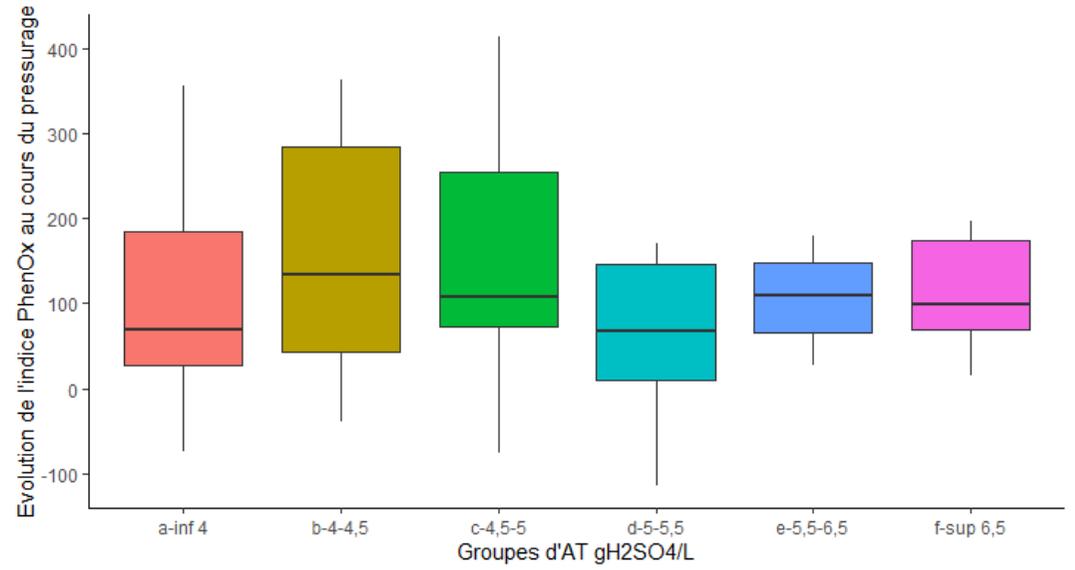


Figure 27 : Evolution de l'indice PhenOx au cours du pressurage en fonction des groupes d'acidité totale ($\text{gH}_2\text{SO}_4/\text{L}$).

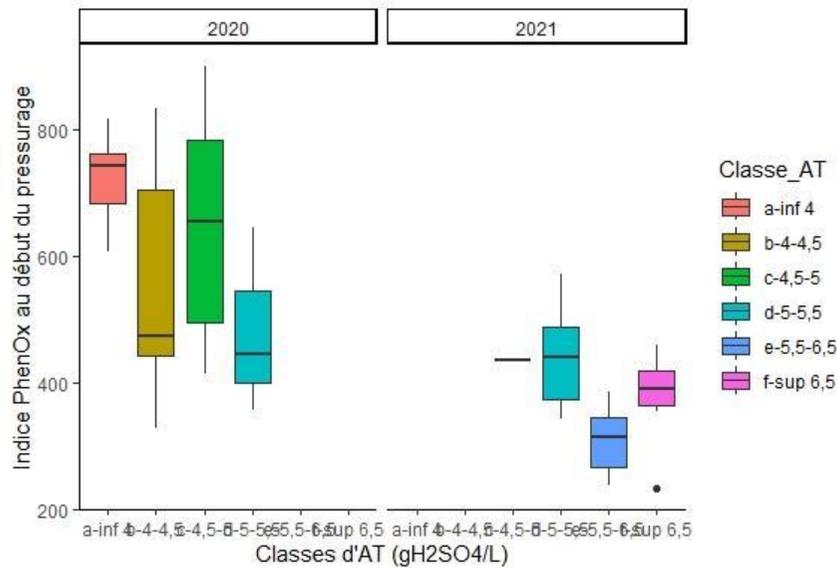


Figure 28 : Indice PhenOx au début du pressurage en fonction de l'acidité totale ($\text{gH}_2\text{SO}_4/\text{L}$) et du millésime.

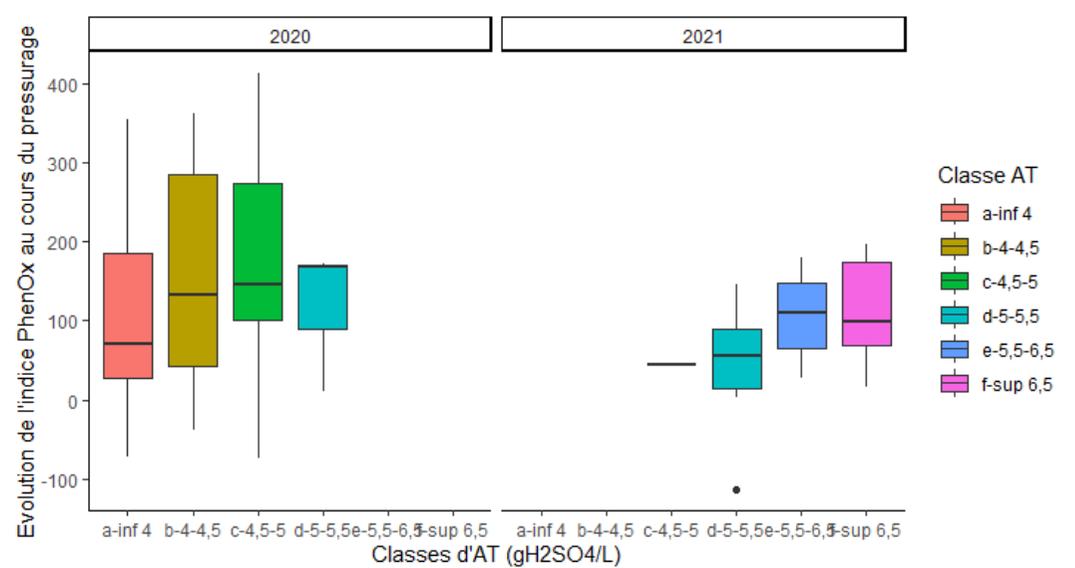


Figure 29 : Evolution de l'indice PhenOx au cours du pressurage en fonction de l'acidité totale ($\text{gH}_2\text{SO}_4/\text{L}$) et du millésime.

Une étude plus approfondie a permis de mettre en évidence **l'implication de l'AT sur les PhenOx mesurés au début du pressurage** (Kruskal-Wallis p-value : $6,368e^{-6} < 0,05$), Figure 26, **mais pas sur l'évolution de cet indice au cours du cycle de pressurage** (Anova p-value : $0,51 > 0,05$), Figure 27. **Au début du pressurage, deux groupes** de jus ont pu être distingués avec une **séparation vers $5gH_2SO_4/L$ d'AT** (Dunn p-value $< 0,05$). Un premier groupe avec **de faible PhenOx mesurés lorsque l'AT était supérieure à $5gH_2SO_4/L$** et un groupe avec **de fort PhenOx pour des AT inférieures à $5gH_2SO_4/L$** . De plus, la visualisation des données, a permis d'observer une **augmentation des indices PhenOx mesurés inversement proportionnelle à la diminution de l'AT** (Kendall cor : $-0,44$ et Spearman cor : $-0,63$), Figure 26.

En comparant les millésimes, Figure 28, **le clivage observé semblait être la conséquence de « l'effet millésime »**, avec uniquement de faible AT en 2020 et a contrario de forte AT en 2021 (Kruskal p-value : $2,15e^{-5} < 0,05$).

Quant à **l'évolution des PhenOx au cours du pressurage, une constance a été observée** avec une variation moyenne de l'indice de 100 points, **quelque soit l'AT** des échantillons analysés (Anova p-value $> 0,05$ et Pearson cor : $-0,13$). Cette même stabilité a été retrouvée pour chacun des millésimes d'études étudiés séparément (Anova $> 0,05$) et intrinsèquement (Anova p-value (2020) : $0,838 > 0,05$ et p-value (2021) : $0,299 > 0,05$), Figure 29.

Les effets cumulés du TAVP et de l'AT ont pu être abordés par l'étude du ratio sucres/acides (S/A). Ce ratio est utilisé pour estimer la maturité technologique des baies et augmente au cours de la maturation des baies. Ce ratio S/A s'est révélé être plus impliqué que les deux paramètres le composant séparés sur l'appartenance des jus étudiés à une classe de pressoir (Anova p-value $0,005449 < 0,05$). Les jus ayant un ratio de S/A faible (< 40) étaient plutôt retrouvés dans la catégorie n°3 des pressoirs tandis que ceux possédant des niveaux de S/A élevés étaient associés à la catégorie n°1. En regardant plus en détails, **le ratio S/A a eu un effet significatif sur les PhenOx mesurés au début du pressurage** (Kruskal-Wallis p-value $6,043e^{-5} < 0,05$), Figure 30, **et sur leurs évolutions**, Figure 31.

Au début du pressurage, **l'augmentation des PhenOx été corrélée à l'augmentation des ratios S/A calculés** (Dunn p-value $< 0,05$; Kendall cor : $0,46$ et Spearman cor : $0,65$). La visualisation des données en fonction du millésime a permis d'observer des différences avec une majorité de **forts ratios S/A en 2020** et de **faibles ratios en 2021** (Kruskal-Wallis p-value : $1,55e^{-5} < 0,05$). **A ratios égaux les PhenOx mesurés étaient plus élevés en 2020 qu'en 2021**, Figure 32. Cependant pour un même millésime aucune variation de PhenOx n'a été retrouvée (Dunn p-value (2020) $> 0,05$ et p-value (2021) $> 0,05$), montrant de nouveau l'impact du millésime sur les différences observées lors de l'exploitation des données dans leur globalité.

Concernant l'évolution du PhenOx au cours du pressurage, une variabilité a été constatée en fonction du rapport S/A (Anova p-value : $0,0462 < 0,05$), Figure 31. **L'évolution du PhenOx au cours du pressurage était moins importante pour les échantillons avec des forts ratios S/A** que pour ceux ayant des faibles ratios (Tukey p-value $< 0,05$). Ainsi, une **faible avancée de la maturité technologique** semble être à l'origine d'une plus **forte évolution des PhenOx** mesurés au cours du pressurage. Cependant, aucune différence significative n'a été trouvée lors de l'étude des données selon les millésimes (Anova p-value $> 0,05$), Figure 33. Seule l'étude inter-millésime a permis de voir des différences de PhenOx selon les ratios S/A pour 2021 uniquement (Tukey p-value (2020) $> 0,05$ et Tukey p-value (2021) $< 0,05$).

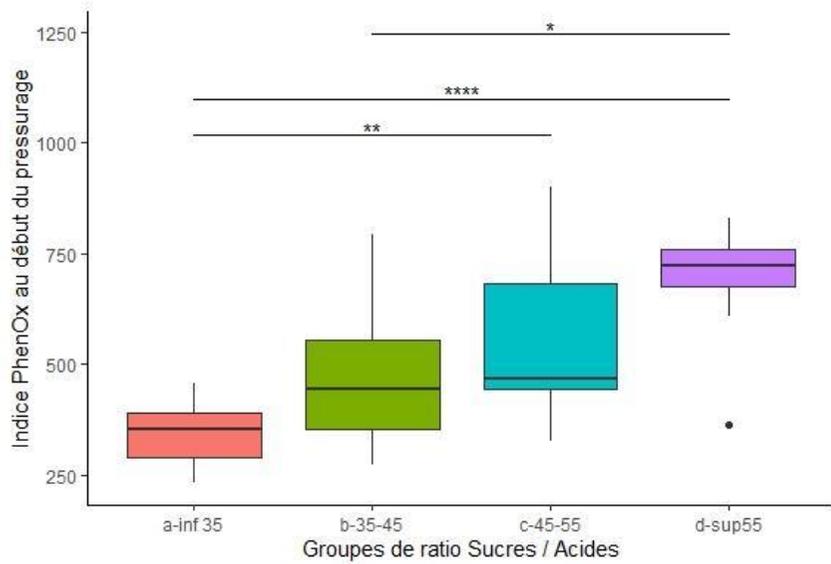


Figure 30 : Indice PhenOx au début du pressurage en fonction des groupes de ratios S/A.

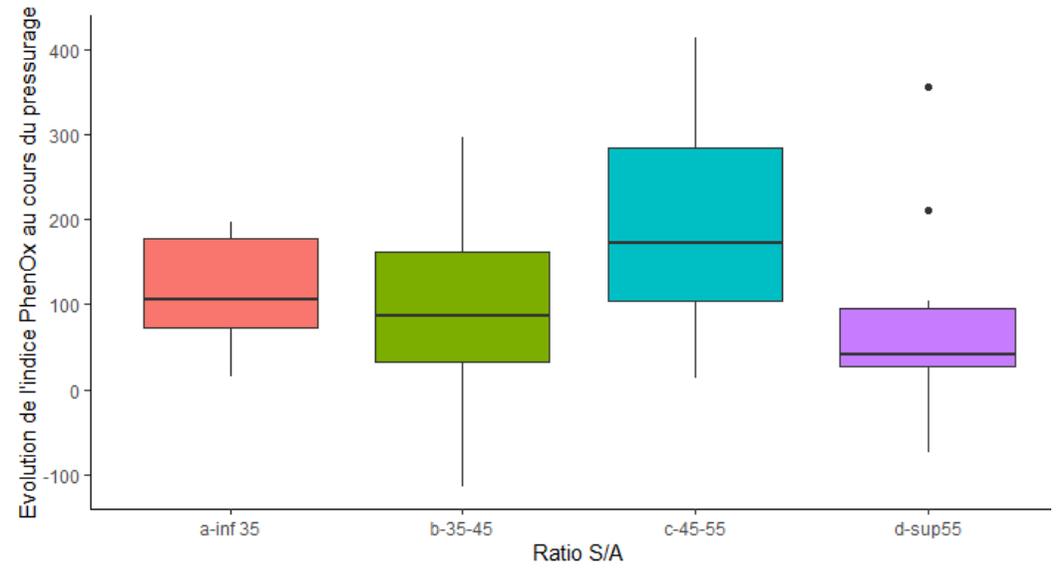


Figure 31 : Evolution de l'indice PhenOx au cours du pressurage en fonction des groupes de ratios S/A.

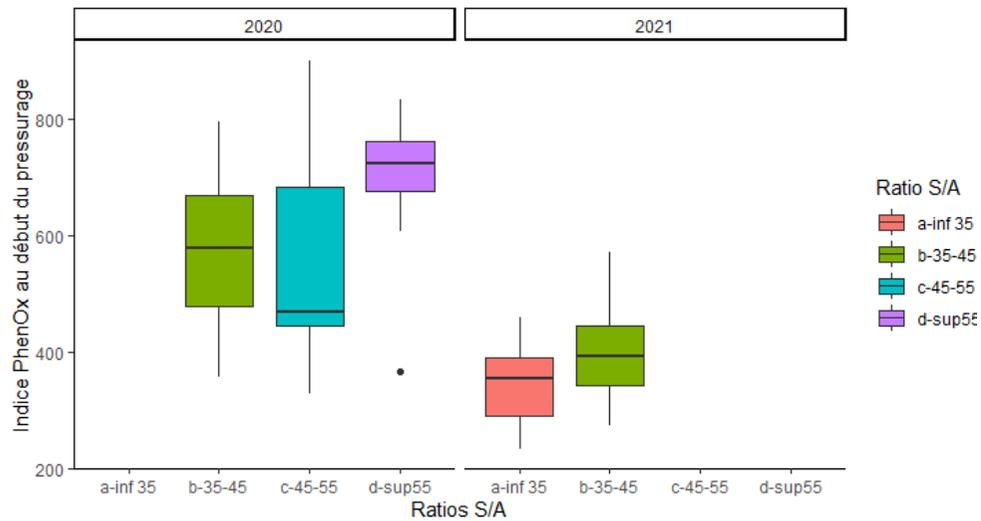


Figure 32 : Indice PhenOx au début du pressurage en fonction du ratio S/A et du millésime.

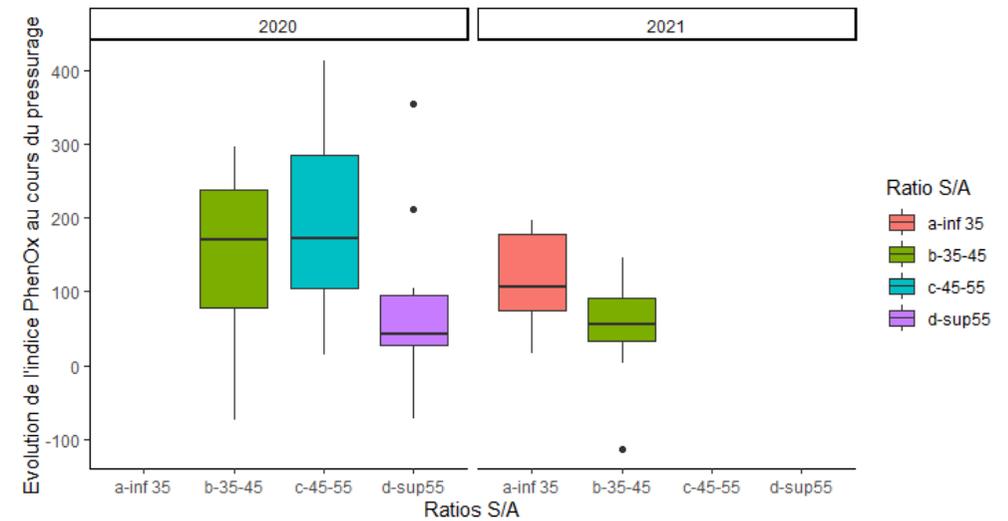


Figure 33 : Evolution de l'indice PhenOx au début du pressurage en fonction du ratio S/A et du millésime.

Dernièrement, **le pH**, dernier paramètre de la maturité analysé à la récolte, **n'a pas permis d'expliquer la répartition des jus dans les différentes catégories de pressoir** (Kruskal-Wallis p-value : 0,297 > 0,05) et ne semblait ainsi pas être impliqué dans les différences de PhenOx observées.

Ces premiers résultats ont permis de constater que **le TAVP, l'AT et le ratio S/A sont les paramètres de la maturité permettant d'expliquer l'extraction des composés phénoliques au cours du pressurage**. En effet, l'AT et TAVP semblent conditionner les valeurs de PhenOx mesurés au début du pressurage, tandis que le ratio S/A apparaît comme un facteur plus impliqué dans l'évolution des PhenOx au cours du cycle. Les PhenOx élevés au début du pressurage ont été mesurés pour des raisins avec des forts TAVP et/ou des faibles niveaux d'AT. Et à l'inverse des faibles PhenOx ont été mesurés pour des baies à faible TAVP et/ou forte AT. De plus, ce sont les baies récoltées à faible maturité technologique qui ont eu une plus grande évolution du PhenOx au cours du pressurage, traduisant une augmentation de l'extraction phénolique au cours du pressurage pour les raisins récoltés à maturité technologique peu avancée.

Dans la baie de raisin, durant la phase herbacée et jusqu'à la véraison une diminution des composés phénoliques solubles est observée, suivie d'une phase de stabilisation. La diffusion de ces composés dépend de leurs solubilités mais aussi de la structure des parois cellulaires. Lorsque la paroi est rigide, la diffusion est limitée, tandis que lorsqu'elle se dégrade, la diffusion se fait plus facilement. Suite aux résultats obtenus plusieurs hypothèses pourraient être avancées. Quand les baies sont récoltées à maturité technologique avancée (fort ratio S/A), la dégradation cellulaire est plus prononcée, favorisant l'extraction des composés phénoliques dès le début du pressurage. Ensuite a lieu une faible évolution de l'extraction car ces derniers sont soit déjà peu nombreux (diminution et stabilisation atteinte), soit fortement extraits dès le début (forte dégradation cellulaire). En revanche, lorsque les baies sont récoltées à maturité technologique moins avancée (faible ratio S/A). Les composés phénoliques sont encore nombreux (diminution peu engagée) et l'évolution de l'extraction au cours du pressurage est importante car les parois sont encore rigides. Ainsi le pressurage brise les parois cellulaires et favorise l'extraction des composés phénoliques encore abondants.

Les résultats ont également mis en avant un effet millésime important à prendre en compte pour une meilleure compréhension des dynamiques observées. De manière générale, l'année 2020 a été marquée par un été sec et chaud, favorisant une accumulation rapide des sucres et une dégradation prononcée de l'acide malique par le soleil. Tandis que 2021 a connu un printemps et un été froid et pluvieux, préservant l'acidité, retardant la maturation des baies et entraînant une dilution des sucres en raison des pluies au moment de la récolte. Ainsi, en 2020, des ratios S/A plus élevés ont été atteints plus tôt qu'en 2021. Cela explique pourquoi à ratio S/A égal, les PhenOx mesurés au début du pressurage et leurs évolutions ont été plus marquées en 2020 qu'en 2021. Le ratio S/A a augmenté rapidement tandis que la diminution de la concentration en composés phénoliques n'était pas totalement engagée. Pour des taux de sucres élevés et des acidités faibles, les composés phénoliques solubles étaient alors encore nombreux.

Ainsi, parmi les groupes de pressoirs, **le groupe n°1** regroupe majoritairement des échantillons avec **une forte extraction phénolique, corrélée à un fort TAVP et /ou faible AT**, ainsi qu'un **fort ratio S/A au moment de la récolte**. Le **groupe 2** représente les échantillons **peu chargés en composés phénoliques ou dont l'extraction est faible**. Ces échantillons sont caractérisés par un **faible TAVP ou une forte AT, mais un ratio S/A élevé**.

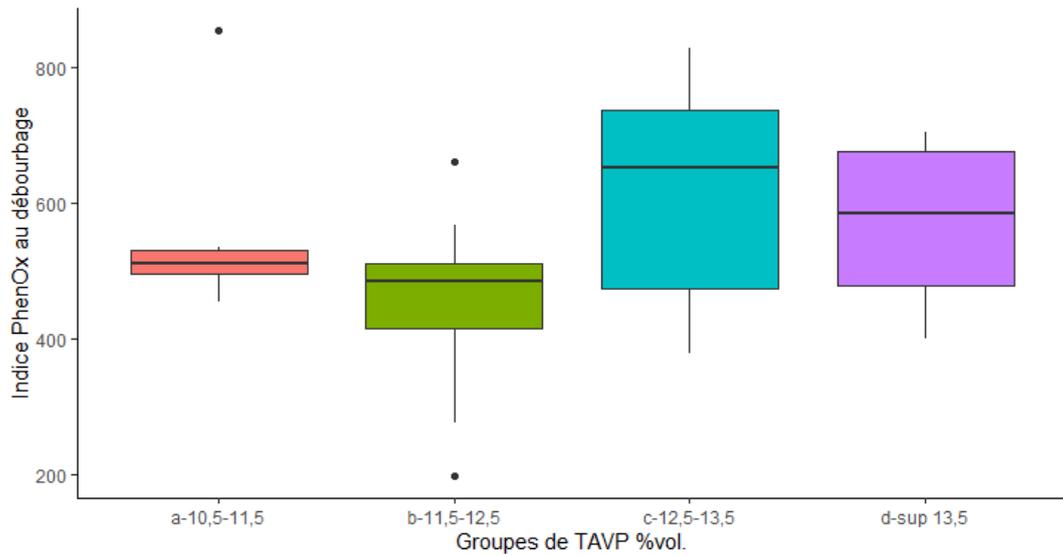


Figure 34 : PhenOx en cuve de débouillage en fonction des groupes de TAVP (%vol.).

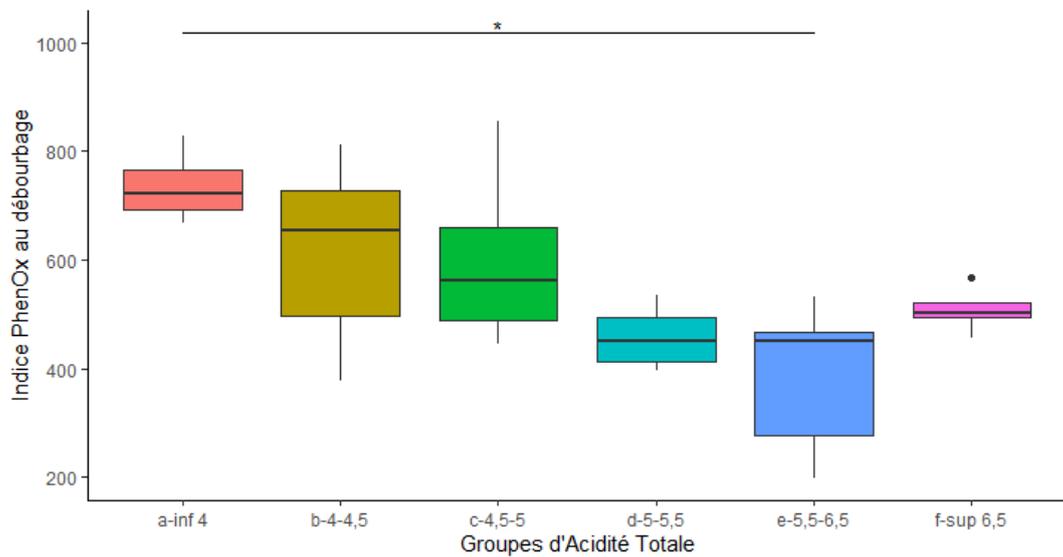


Figure 35 : PhenOx en cuve de débouillage en fonction des groupes d'AT (gH₂SO₄/L).

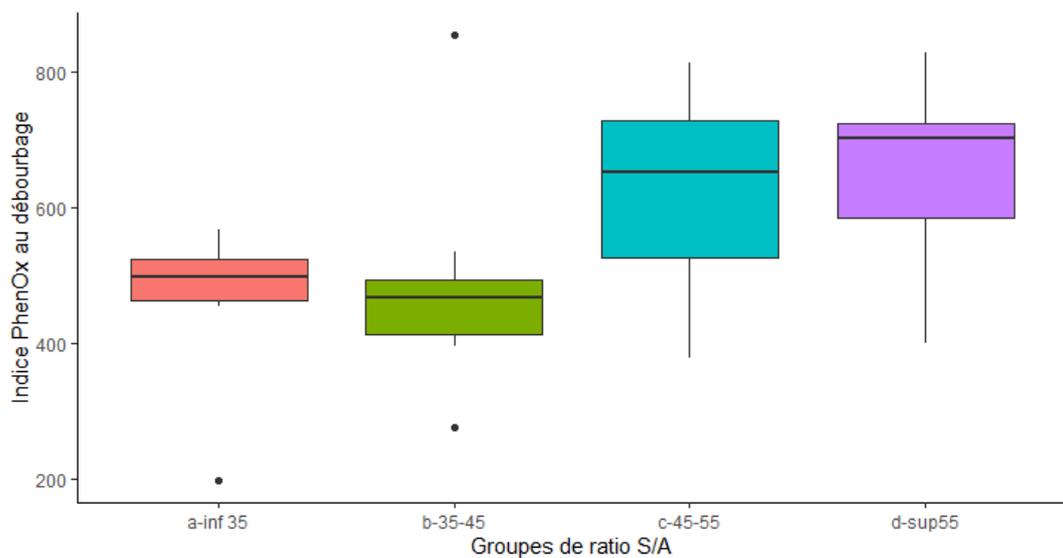


Figure 36 : PhenOx en cuve de débouillage en fonction des ratios S/A.

. Et enfin, le **groupe 3** comporte les échantillons dont **l'évolution de l'extraction des composés phénoliques est importante** au cours du pressurage. Les échantillons de ce groupe ont majoritairement **un faible ratio S/A** et sont peu avancés au niveau de la maturité technologique. Ces observations laissent penser que le ratio S/A et donc la maturité technologique jouent un rôle dans l'extractibilité des composés phénoliques.

2. Etude des paramètres de la maturité sur les PhenOx obtenus en cuve de débouillage

A la suite du pressurage, des **mesures de l'indice PhenOx** ont été réalisées **en cuve de débouillage**. Les mesures ont été faites sur le jus clair, à la fin du débouillage, avant levurage ou départ en FA. En confrontant les indices PhenOx obtenus aux paramètres de la maturité, plusieurs observations ont été faites.

Tout d'abord, les PhenOx mesurés semblaient être corrélés positivement avec l'augmentation des TAVP des échantillons analysés, Figure 34. Cependant cette tendance ne s'est pas révélée significative (Kruskal-Wallis p-value : 0,117 >0,05). Les valeurs de **PhenOx mesurés en cuve de débouillage apparaissent ici comme étant une conséquence des PhenOx mesurés au pressurage** et expliqués par les niveaux de TAVP. Si les PhenOx étaient élevés dès le début pour des TAVP importants et que l'évolution au cours du pressurage était plutôt stable pour les différents TAVP, alors cela apparaît comme approprié de mesurer des PhenOx sensiblement plus élevés en cuve de débouillage pour les échantillons avec des TAVP élevés.

A l'inverse, **l'AT a permis d'expliquer la variabilité des PhenOx mesurés au débouillage** (Anova p-value: 0,001 <0,05). Les analyses ont révélé que 46% de la variance de la variable réponse, soit l'indice PhenOx, peut être expliquée par l'AT (Anova η^2 : 0,465). Ainsi, **un très fort effet de l'AT sur les PhenOx mesurés au débouillage a été observé**, Figure 35.

Enfin, le ratio S/A a également permis d'expliquer une partie de la variation des PhenOx mesurés au débouillage (Kruskal-Wallis p-value : 0,0379 <0,05). Tout comme au début du pressurage, deux groupes semblaient se distinguer avec d'un côté un groupe avec un faible S/A et de l'autre un groupe avec un fort S/A, Figure 36.

A cette étape également, le pH n'a pas permis d'expliquer les différences de PhenOx mesurés.

Néanmoins, pour chacun des paramètres de la maturité, en scindant par millésime d'étude, tout comme pour le pressurage, **les tendances observées ont été souvent dues à l'effet millésime**. Globalement les PhenOx étaient plus élevés en 2020 et au cours du pressurage l'évolution de l'extraction des composés phénoliques était plus importante pour ce même millésime. Ainsi, les échantillons analysés en 2020 avaient une charge plus élevée en composés phénoliques à la fin du pressurage que ceux étudiés en 2021. Bien que la charge ait été abaissée au cours du débouillage, cela semble logique d'avoir une charge toujours plus élevée à la fin du débouillage.

Ces données ont permis de mieux comprendre l'implication des paramètres de la maturité sur les l'extraction des composés phénoliques lors du pressurage et les répercussions en cuve de débouillage. Cependant, aucun paramètre unique permet d'expliquer l'appartenance des jus étudiés à une catégorie de pressoir. Les tendances observées sont multi-paramètres et nécessitent d'être approfondies.

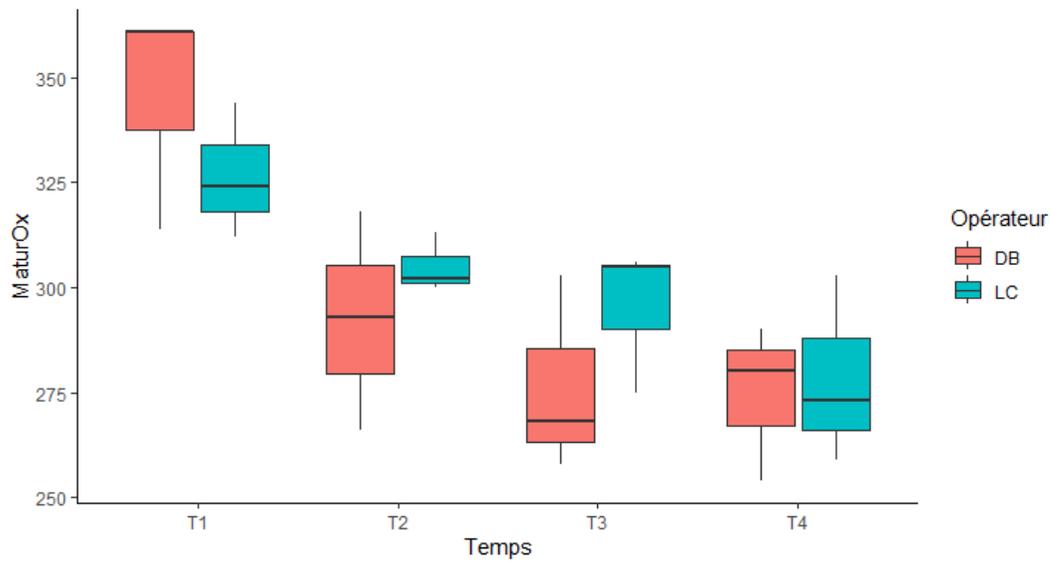


Figure 37 : Indice MaturOx en fonction du temps et de l'opérateur.

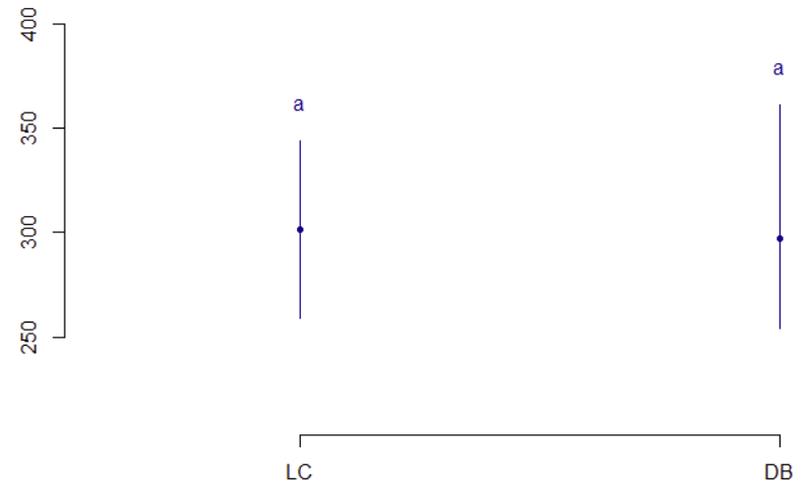


Figure 38 : Indice MaturOx en fonction des opérateurs.

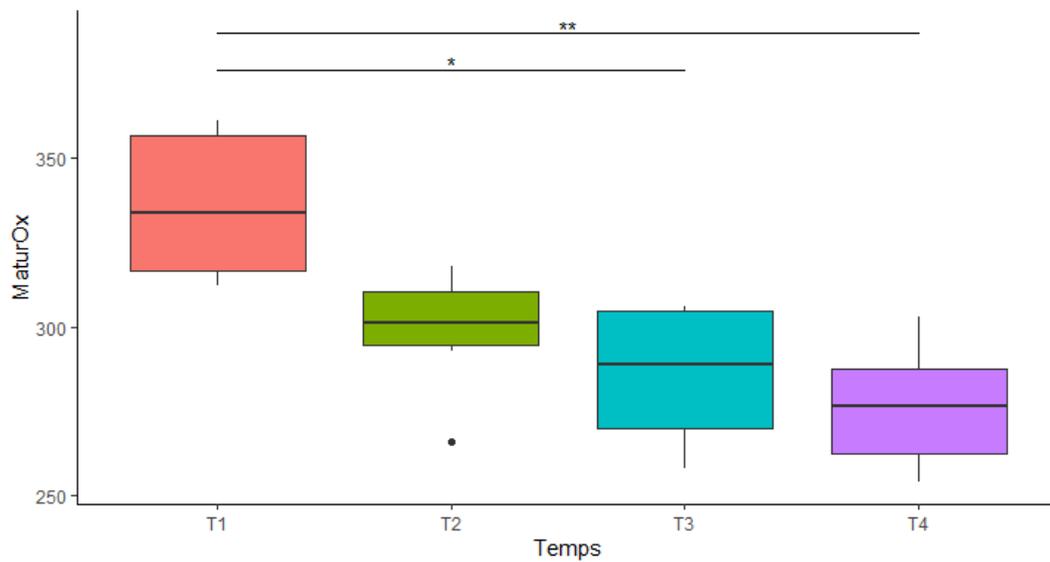


Figure 39 : Indice MaturOx en fonction du temps d'attente entre le foulage et l'analyse au Polyscan.

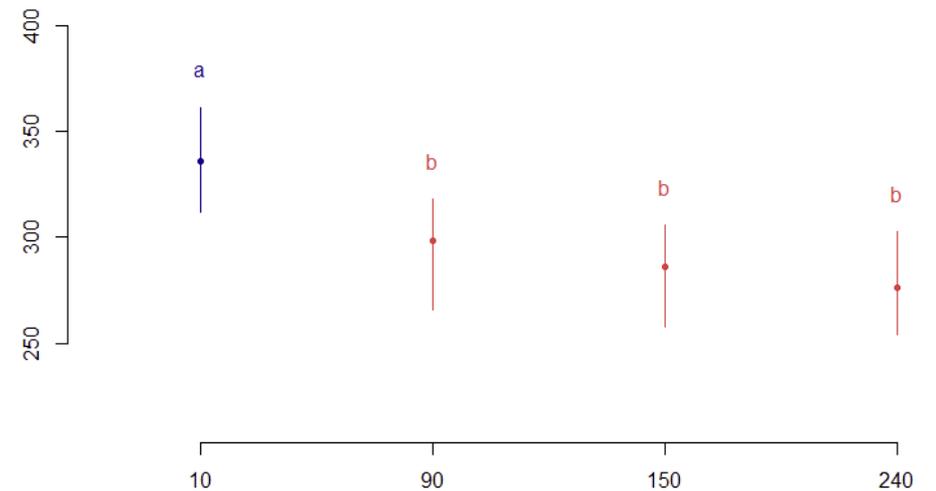


Figure 40 : Indice MaturOx en fonction des temps d'attente entre le foulage et l'analyse au Polyscan.

B. Présentation des données acquises en 2024

Les relations entre les mesures au moment du pressurage et celles réalisées en cuves de débouillage ont été examinées au cours des différentes campagnes VOLTA, permettant d'établir certaines corrélations. Par exemple, des **faibles niveaux PhenOx en fin de débouillage étaient associés à une meilleure résistance à l'oxydation (indice TE) des vins au stade fin FA**. À l'inverse les moûts présentant des **PhenOx élevés en cuve de débouillage montraient une sensibilité en fin FA** (BIVB, 2022b). Bien que les pratiques au cours de l'élevage puissent impacter la stabilité des vins, il est important de comprendre l'impact des composés oxydables dès les premières étapes de vinifications.

D'après les résultats de 2020 et 2021 présentés ci-dessus, **l'état de maturité des raisins conditionne en partie l'extraction des composés phénoliques au pressurage et donc les niveaux retrouvés en cuves de débouillage**. Cela souligne la nécessité d'approfondir les recherches sur la maturité, notamment avec une caractérisation plus poussée via de nouveaux outils ou indicateurs.

Dans un premier temps, la validation du protocole expérimentale sera présenté. Dans un second temps, après une présentation du millésime 2024, les résultats sur l'essai mené seront exposés.

1. Validation du protocole expérimental

La méthode utilisée pour mesurer l'indice MaturOx a été testée et validée à l'aide d'un protocole expérimental. Après visualisation et vérification des données, des tests statistiques ont permis de mettre en évidence les paramètres ayant un impact sur l'indice MaturOx et leurs effets sur la mesure de celui-ci. Ainsi, **la variable « opérateur » n'a pas eu d'influence sur les MaturOx mesurés** (Anova p-value >0,05), Figure 37 et Figure 38, mais **un effet temps a été observé** (Anova p-value : 0,0008 <0,05), Figure 39. Cependant, **aucune interaction entre le temps et l'opérateur s'est révélée impactante** sur la mesure du MaturOx (Anova p-value >0,05).

En outre, **une forte corrélation négative a été observée avec une diminution de l'indice MaturOx lorsque le temps entre le foulage et la mesure de l'indice augmente** (Pearson cor : -0,728). Deux groupes ont été identifiés avec un premier groupe où le temps entre le foulage et l'analyse était inférieur à 10 secondes, puis un second groupe où le temps était supérieur à 10 secondes, Figure 40. Cet effet temps observé est fortement lié à aux réactions d'oxydation enzymatique qui ont lieu dès la perte de l'intégrité cellulaire des baies.

Afin d'éviter cela, l'échantillon d'étude doit être le plus stable possible, c'est-à-dire que l'intégrité de la baie ne doit pas dû être rompue au moment du prélèvement, les échantillons doivent être protéger des enzymes oxydatives et enfin la mesure du MaturOx doit être réaliser sans que l'échantillon ait été mis au contact de l'oxygène (travail en milieu inerte).

Cette approche expérimentale a permis **d'affirmer la possibilité d'équiper des sites autonomes pour réaliser les mesures du MaturOx, grâce à l'absence d'effet dû aux différents opérateurs**. Néanmoins un facteur temps a été mis en évidence, avec **un temps inférieur à 10 secondes entre le foulage et l'analyse à respecter afin d'obtenir les données les plus fidèles** et robustes possibles.

Tableau 9 : Exemple des données de suivies pour une parcelle d'étude.

Date	MaturOx	Poids	Sucre	TAVP	AT	pH	Acide malique	Nass	S/A
		g	g/L	%vol.	gH ₂ SO ₄ /L		g/L	mg/L	
12-août	645	218	65	3,86	17,15	2,67	17,90	200	3,79
19-août	420	256	98	5,82	10,90	2,86	10,10	218	8,99
26-août	411	278	128	7,61	8,63	2,94	7,20	227	14,83
02-sept	355	310	154	9,15	6,43	3,10	4,30	241	23,95
09-sept	420	326	163	9,69	5,77	3,13	3,50	233	28,25

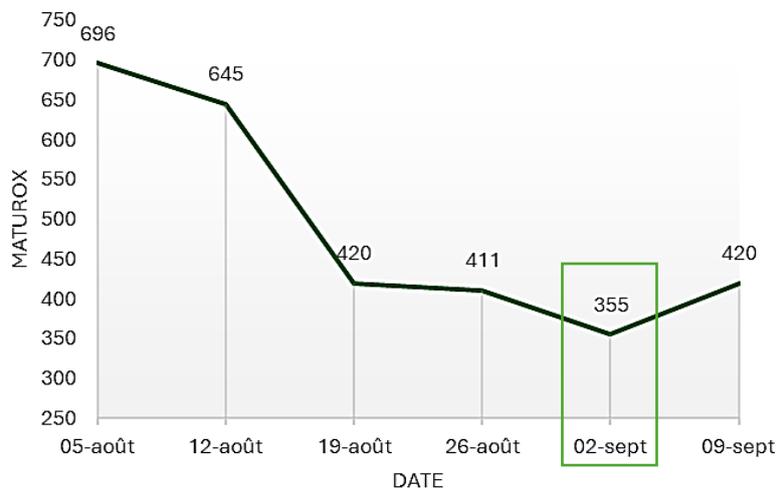


Figure 41 : Evolution du MaturOx au cours de la maturation et identification du minimum.

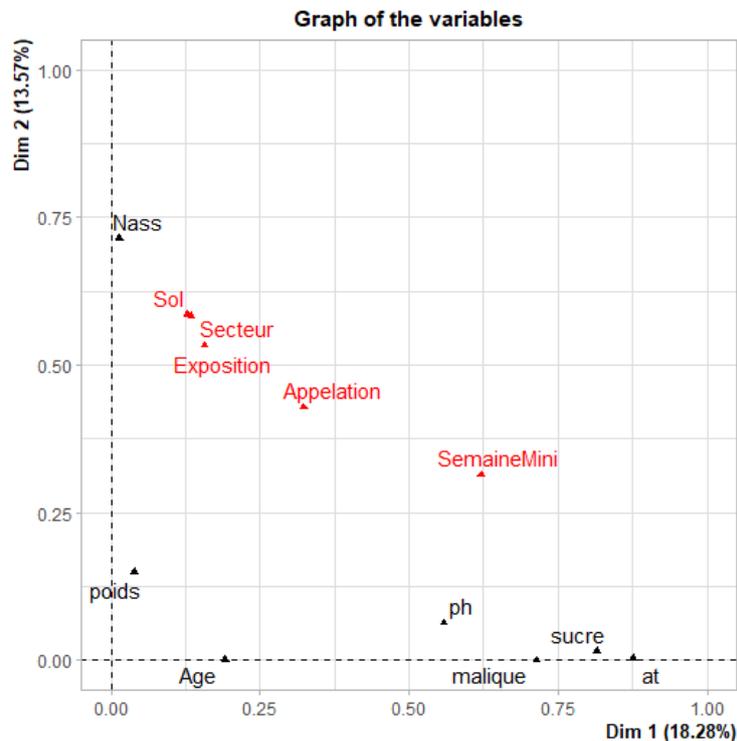


Figure 42 : Contribution des variables aux dimensions 1 et 2 de la FAMD.

2. Comprendre le millésime

L'année 2024 a été marquée par **un hiver doux** avec des températures au-dessus de la normale, favorisant la reprise du cycle végétatif précocement. Ensuite, l'année s'est poursuivie avec **un printemps pluvieux et peu ensoleillé**. Plusieurs épisodes pluvieux intenses ont été enregistrés, avec un excédent important de +44% en moyenne, atteignant même +85% sur certains secteurs. Aussi, les cumuls des précipitations ont été largement au-dessus des normales avec plus d'un jour de pluie sur deux comptabilisés (Météo France, 2024).

A partir de mai, des températures conformes aux normales de saison voir légèrement au-dessus ont été retrouvées, favorisant le développement végétatif. Fin mai, les toutes premières fleurs ont été observées puis **la floraison s'est déroulée durant la première quinzaine de juin**. Les conditions météorologiques de ce printemps ont été très défavorables, avec une **pression mildiou importante** et beaucoup de coulure à la floraison, amplifiée par les épisodes de grêles et gelées tardives.

Durant l'été, la phénologie a été aussi hétérogène et perturbée que la météo. En effet, si le développement baies a bien progressé sur certains secteurs, des parcelles à la nouaison ont encore été observées mi-juillet. La fermeture de la grappe, fortement variable, a été effective courant juillet et les **premières baies verrées ont été observées fin juillet**. La **véraison a été pleinement engagée autour du 16 août**, laissant présager des vendanges pour mi-septembre. La dernière partie du mois d'août a été marquée par des **épisodes de pluies intenses** et localisés **perturbant l'avancée de la maturation**. Le mois de **septembre** a été marqué par une **période venteuse et quelques jours de beaux temps, suivis de fortes perturbations**. Enfin, les **vendanges ont été réalisées durant la dernière quinzaine de septembre** à cause de **l'état sanitaire fortement dégradé**, tandis que **les maturités souhaitées n'étaient pas encore atteintes** (Monamy & Chambre d'Agriculture, 2024).

3. Caractérisation de la maturité

Les suivis de la maturation ont débuté dès la mi-véraison (50% des baies verrées). Soit à partir du 12 août 2024 pour les parcelles les plus précoces, puis se sont terminés à quelques jours des vendanges, entre le 10 et le 17 septembre. Chaque parcelle a été suivie sur une période de 4 à 6 semaines, Tableau 9. Au cours de cette période, **une mesure hebdomadaire du MaturOx a permis d'identifier le minimum de MaturOx et la date à laquelle celui-ci a été atteint**, Figure 41. De plus, deux catégories de facteurs ont été suivis et évalués. D'un côté les **paramètres évolutifs** directement liés au processus de maturation des baies tels que la **concentration en sucre, l'acidité totale, le pH** et etc... Et de l'autre côté, les **paramètres fixes** tels le **secteur géographique, le type de sol, l'exposition et l'âge** des parcelles. Ces paramètres ne varient pas durant le cycle de maturation, mais peuvent jouer un rôle clé dans la manière dont chaque parcelle évolue.

Dans un premier temps, une FAMD a permis de synthétiser l'information mais aussi d'identifier les similitudes et les différences des parcelles en fonction des caractéristiques observées. La projection des données a permis d'observer que les variables Acidité totale, Date du minimum de MaturOx, Sucre et Acide malique étaient fortement associées à la dimension 1, tandis que les variables Nass, Date du minimum de MaturOx, Secteur géographique et Exposition contribuaient davantage à la seconde dimension, Figure 42.

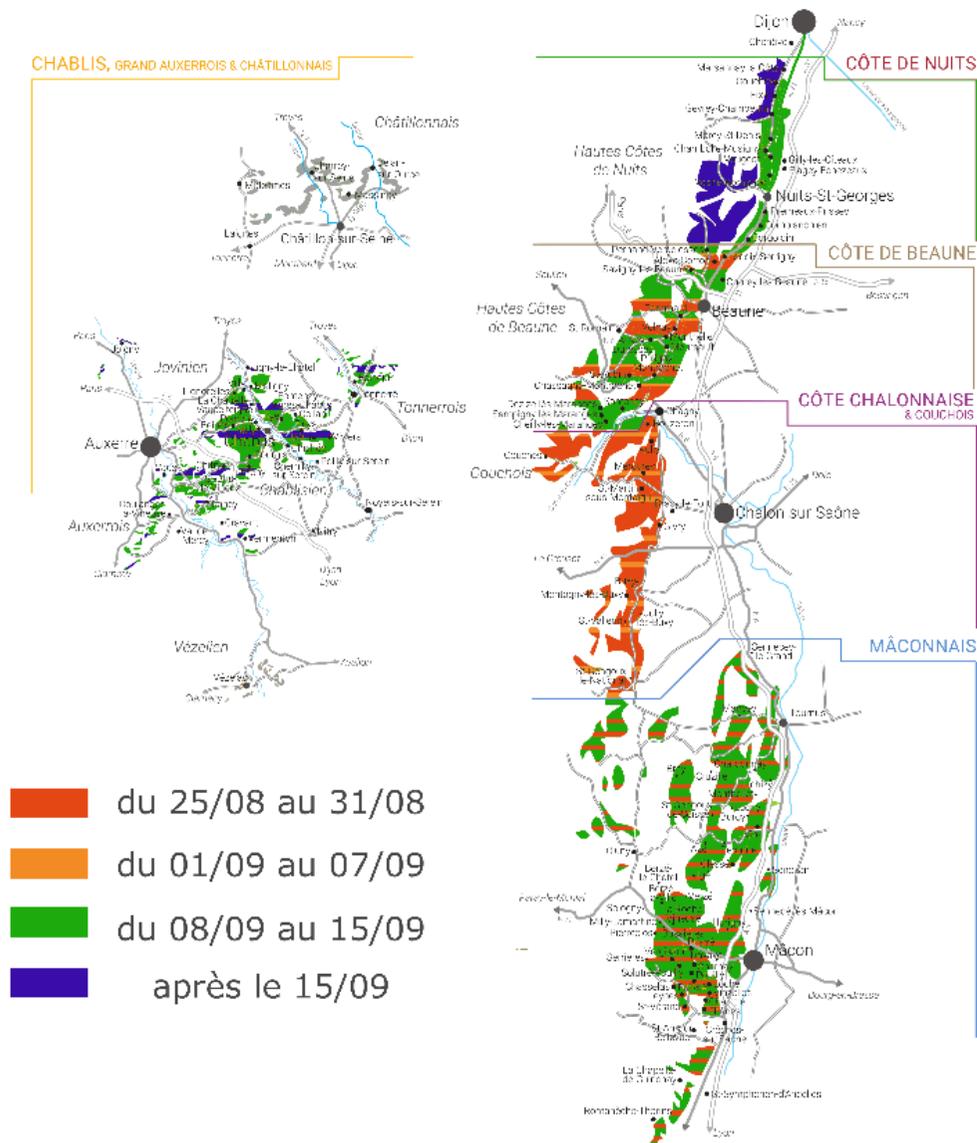


Figure 43 : Visualisation des dates de minimum de MaturOx par secteur.

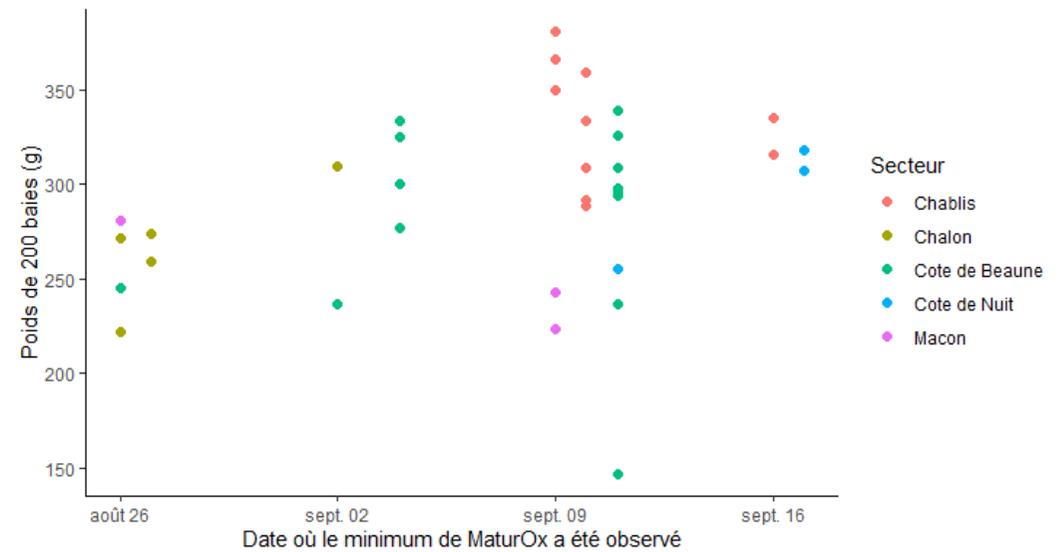


Figure 44 : Poids de 200 baies en fonction des secteurs au moment du minimum de MaturOx.

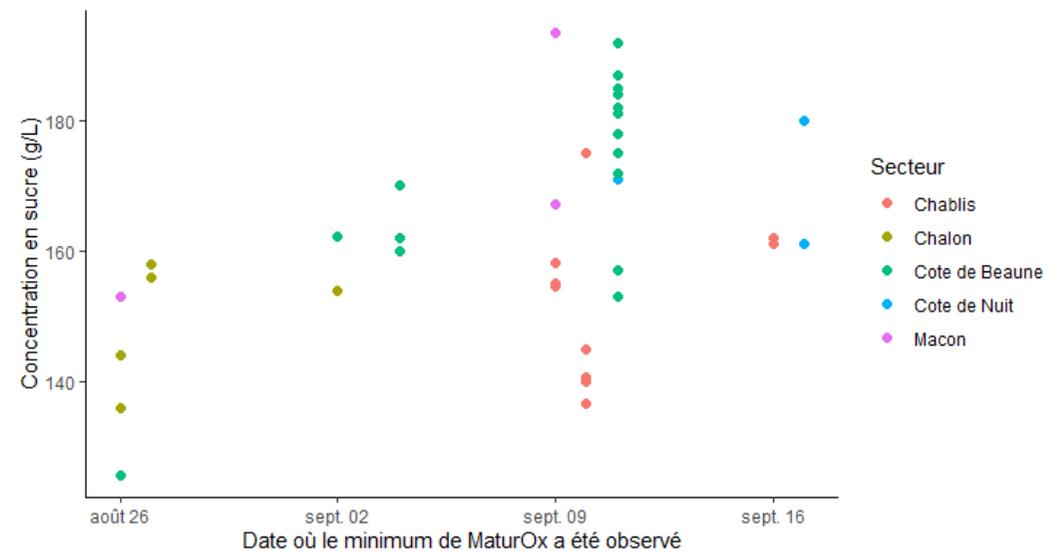


Figure 45 : Concentration en sucre en fonction des secteurs au moment du minimum de MaturOx.

De plus, **la date du minimum de MaturOx, appartient aux deux dimensions, montrant son importance pour la compréhension des dynamiques de maturation.** Ainsi, l'analyse FAMD a renforcé l'idée que l'analyse de ces variables pourraient permettre de mieux comprendre la maturation, bien que certaines parcelles partagent des caractéristiques similaires en termes de conditions pédo-géo-climatiques. Ce constat justifie la pertinence du suivi des différents paramètres choisis et de l'indice MaturOx pour affiner la caractérisation et le suivi de la maturation.

Dans un second temps, les liens entre les dates de minimum de MaturOx et les paramètres suivis ont été observés.

D'après les suivis, **environs 15.5 jours à partir de la mi-véraison ont été écoulés avant d'observer le minimum de MaturOx.** Ainsi, **les minimums de MaturOx ont été observés entre les semaines 35 et 38.** Soit entre le 26 août et le 22 septembre, avec une majorité enregistrés entre le 2 et le 11 septembre.

Une **forte hétérogénéité** des dates a été observée, **associée à un gradient géographique du Sud vers le Nord** (Kruskal-Wallis p-value : 0,001 <0,05), Figure 43. Globalement, les parcelles situées le plus au Sud, dans le Mâconnais et sur la Côte Chalonnaise ont atteint leur minimum de MaturOx en premier, suivies par celles de la Côte de Beaune, de la Côte de Nuits et enfin du Chablisien.

Pour les différentes dates de minimum de MaturOx observées, les valeurs des paramètres de la maturité à ce moment-là et leur implication dans l'apparition de ce minimum ont été analysées. La concentration en sucre (Régression p-value : 0,0004 <0,05), l'acidité totale (Régression p-value : 0,002 <0,05) et l'acide malique (Régression p-value : $3,3e^{-5}$ <0,05) comptaient parmi les variables les plus influentes. L'interaction entre le sucre et l'acidité totale est également apparue comme étant significative (Régression p-value : 0,042 <0,05).

Tout d'abord, **au moment du minimum de MaturOx, le poids moyen des 200 baies était de 293g.** Une **corrélation positive modérée** (Spearman cor : 0,3) entre l'augmentation du poids des baies et la date de minimum de MaturOx a été relevée, bien que celle-ci soit non significative (Kruskal-Wallis p-value >0,05), Figure 44. Cependant, en discriminant par secteur géographique, des différences significatives ont été mises en évidence. Avec les baies provenant du Chablisien étaient globalement plus lourdes que celles provenant des autres secteurs (Kruskal-Wallis p-value <0,05).

Par ailleurs, **au moment du minimum de MaturOx** la majorité des parcelles avaient **un taux de sucre compris entre 140 g/L et 180 g/L**, Figure 45. Cela correspond à un TAVP compris entre 8,5 et 10,5 %vol. Or, d'après la littérature, les minimums de MaturOx sont généralement observés pour des taux de sucres autour de 20°B, soit 200g/L. Cependant ces études sont principalement basées sur des analyses de Sauvignon blanc. Les résultats obtenus ont montré que pour Chardonnay blanc, en Bourgogne, le minimum de MaturOx était plutôt atteint, pour des concentrations en sucres inférieures à 180g/L, soit bien en dessous des valeurs observées pour le Sauvignon blanc.

De plus, les analyses statistiques ont permis d'observer une **forte corrélation positive** (Pearson cor : 0,47). **Des niveaux de sucres plus élevés ont été retrouvés pour les parcelles où la date de minimum de MaturOx était la plus tardive** (Anova p-value : 0,002 <0,05), Figure 45.

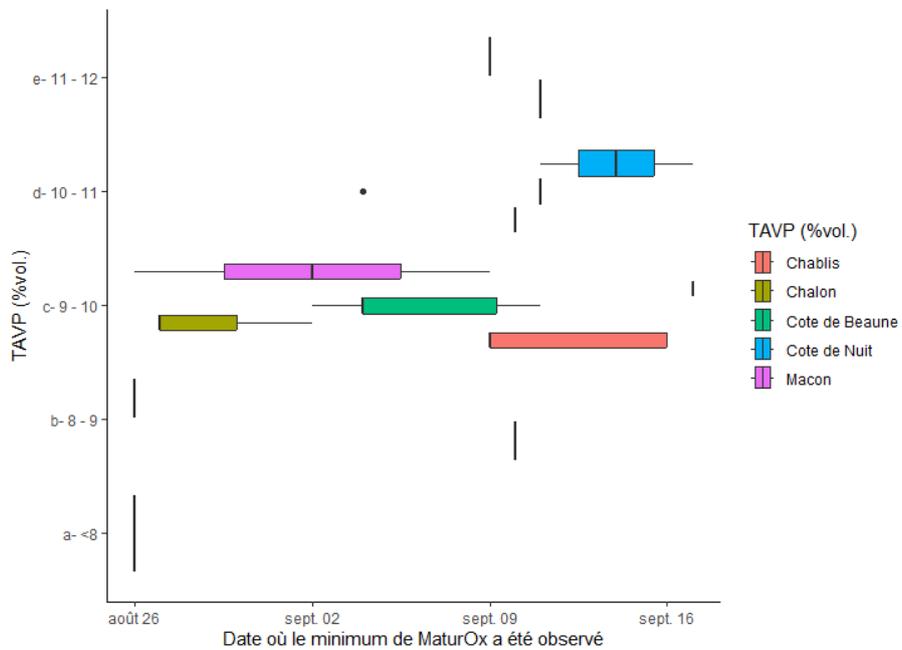


Figure 46 : TAVP (%vol.) en fonction des Secteurs au moment du minimum de MaturOx.

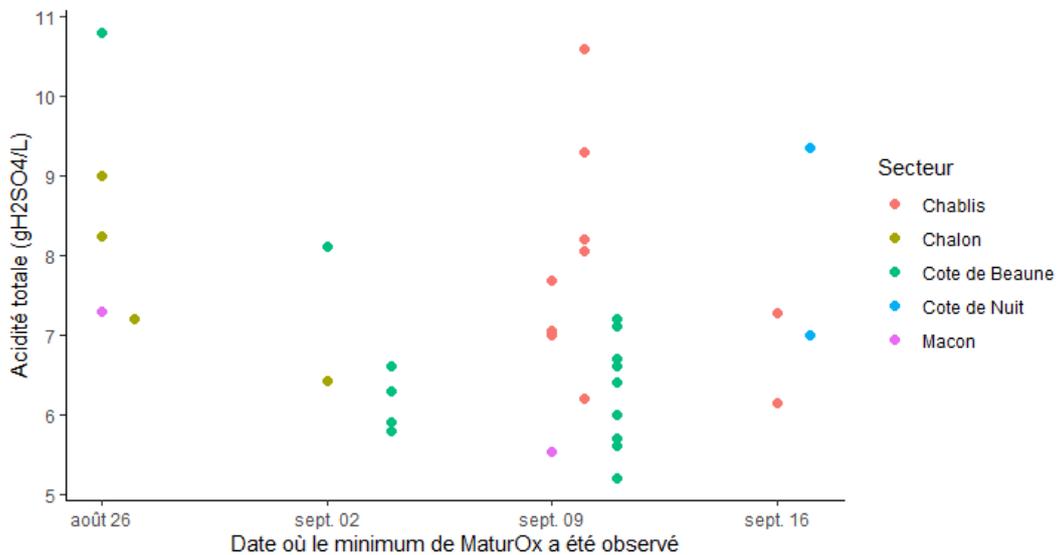


Figure 47 : AT en fonction des secteurs au moment du minimum de MaturOx.

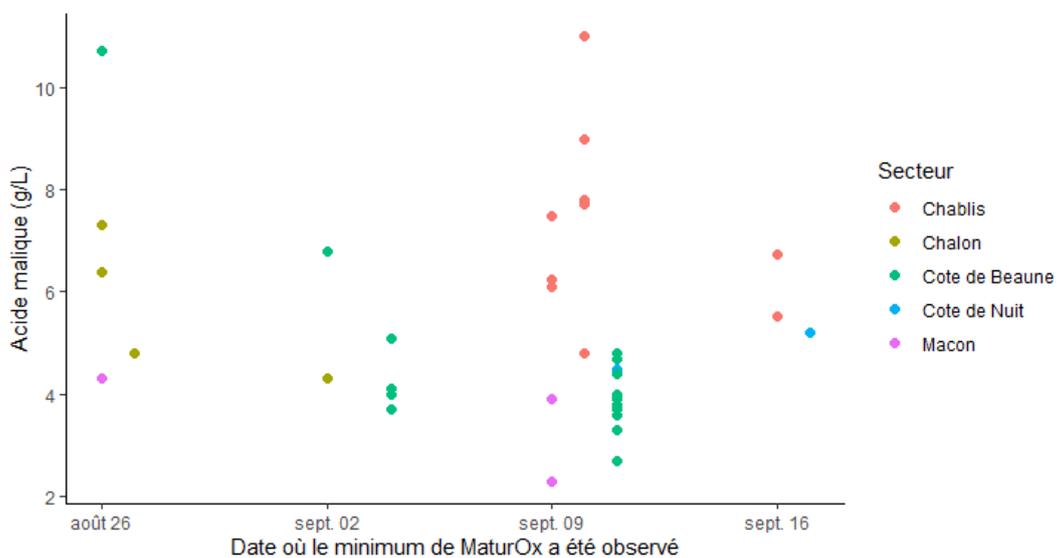


Figure 48 : Acide malique (g/L) en fonction des secteurs au moment du minimum de MaturOx.

En discriminant par secteur géographique, **des différences ont été relevées entre les secteurs mais également en leur sein-même**. Par exemple, pour une même date d'observation du minimum de MaturOx, les parcelles de la Côte de Nuits présentaient des TAVP plus élevés que celles situées à Chablis, Figure 46.

Cette variation pourrait s'expliquer par la densité de plantation ou encore les conditions climatiques très différentes entre ces deux régions. À Chablis, la densité de plantation est plutôt faible avec 6 000 pieds par hectare et les précipitations ont été abondantes durant l'été. En revanche, sur la Côte de Nuit, la densité de plantation est élevée avec plus de 15 000 pieds à l'hectare et les pluies ont été moins importantes. Ainsi, les parcelles ont subi une contrainte hydrique moins importante dans le Chablisien que sur la Côte de Nuits, limitant la concentration en sucre des baies. À l'inverse, pour les parcelles sur le secteur de Nuits la concentration en sucre a été favorisée par une concurrence hydrique plus importante. Une étude plus approfondie de l'impact de la densité de plantation et de la pluviométrie pourrait venir renforcer cette hypothèse et clarifier leurs rôles dans la maturation. Une analyse interannuelle permettrait également de vérifier si les tendances observées sont spécifiques au millésime ou si elles sont récurrentes sur plusieurs années.

Aussi, **lorsque le minimum de MaturOx a été observé, l'acidité totale était plutôt élevée**, avec des valeurs comprises **entre 5 et 10 gH₂SO₄/L**. **Pour une même date de minimum, différents niveaux d'acidités ont été représentés révélant une forte hétérogénéité**, Figure 47. Bien qu'aucune relation significative ait été établie (Anova p-value >0,05) **une corrélation négative** (Pearson cor : -0,30) a été observée, suggérant que l'AT diminuait fortement à mesure que la date du minimum de MaturOx était tardive.

L'analyse par secteur géographique a montré que les parcelles situées au Nord de la Bourgogne avaient des AT élevées tandis que celles situées plus au Sud avaient des AT faibles au moment du minimum. Des différences significatives entre secteurs ont été établies, avec notamment la Côte Chalonnaise qui s'est distinguée des autres secteurs (Kruskal-Wallis p-value <0,05). Des variations importantes au sein même d'une zone, comme sur la Côte de Beaune par exemple, ont également été identifiées.

Parmi les composés contribuant à l'acidité totale, **l'acide malique est apparu comme impliqué dans les variations des dates de minimum de MaturOx** (Anova p-value <0,05). **Des concentrations relativement élevées, comprises entre 3 et 9 g/L, ont été observées lors du minimum de MaturOx**, Figure 48.

Des fortes variations ont également été relevées par secteur géographique. Des taux élevés, entre 5 et 9 g/L, ont été retrouvés dans parcelles situées dans les secteurs nordiques comme sur la Côte de Nuits et dans le Chablisien, mais aussi étonnamment sur la Côte Chalonnaise pourtant plus au Sud. En revanche, des valeurs plus faibles d'acide malique, entre 3 et 5 g/L, ont été mesurées vers Mâcon et sur le secteur Beaunois.

Ces variations pourraient être dues à l'orientation des rangs, influençant l'exposition des baies au soleil et favorisant plus ou moins la dégradation de l'acide malique. Pourtant, les analyses statistiques n'ont pas permis de mettre en exergue ces effets d'interactions émis en hypothèse (Kruskal-Wallis p-value >0,05).

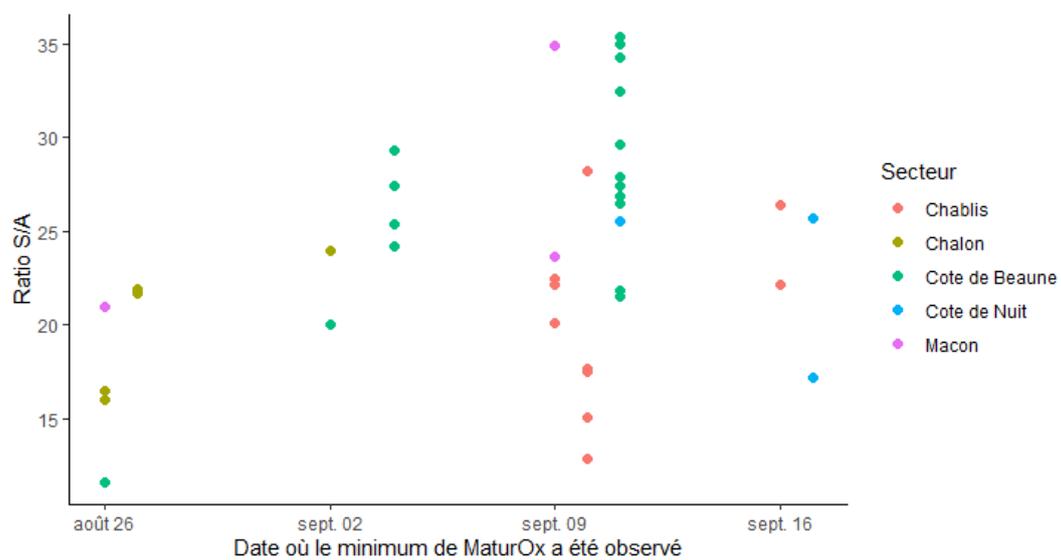


Figure 49 : Rapport S/A en fonction des secteurs au moment du minimum de MaturOx.

Le ratio S/A a également été analysé en fonction des dates de minimum de MaturOx. Cette donnée est souvent utilisée par les viticulteurs pour leur prise de décision à la récolte. Son analyse semblait donc pertinente. **Des ratios S/A compris entre 15 et 30 ont été calculés au moment du minimum de MaturOx**, Figure 49. Une **corrélation positive modérée** a été observée entre l'augmentation du ratio et la tardivité des dates du minimum de MaturOx observés (Pearson cor : 0,35). Cependant aucune différence significative a été établie (Kruskal-Wallis p-value : 0,082 >0,05) entre la date de minimum de MaturOx et la valeur du ratio S/A.

En zoomant par secteur, les résultats obtenus étaient similaires à ceux observés pour les autres paramètres de la maturité, avec des différences significatives entre certains secteurs (Kruskal-Wallis p-value : 0,031 <0,05). De faibles ratios S/A ont été calculés dans le Mâconnais et sur la Côte de Beaune traduisant une maturité technologique peu avancée au moment de la mesure du minimum de MaturOx. La tendance inverse a été observée pour les parcelles situées sur la Côte de Nuits et dans l'Yonne.

Par ailleurs, **des pH compris entre 2,9 et 3,1 ont été mesurés au moment du minimum de MaturOx** Et **le taux d'azote assimilable (Nass) au moment du minimum de MaturOx était plutôt stable, autour de 200mg/L**. Cependant, **aucun effet explicatif de ces deux variables sur la date du minimum de MaturOx** (Anova (pH) p-value : 0,309 >0,05 ; Kruskal-Wallis (Nass) p-value >0,05) et **aucune corrélation** n'ont été observés.

Ces résultats ont permis de montrer que **l'apparition de ce minimum n'est pas systématiquement associée à des valeurs spécifiques d'un ou plusieurs paramètres de la maturité**. Certaines variables et leurs interactions semblent corrélées aux variations de l'apparition du minimum MaturOx, mais aucune variable unique est directement liée. De plus, une forte influence du secteur géographique a été observée, soulevant des interrogations sur **l'influence des facteurs fixes des parcelles sur les paramètres de la maturité mesurés au moment du minimum de MaturOx**.

L'analyse des paramètres fixes a permis de voir, qu'en plus du secteur géographique, **le type de sol, l'exposition et le secteur géographique jouent un rôle particulier et allongent le délai d'apparition du minimum de MaturOx** (Régression p-value <0,05).

En effet, concernant les secteurs géographiques, les parcelles situées en Côte de Beaune ont vu leur date de minimum de MaturOx retardée de 7 jours environs par rapport à la moyenne (Régression p-value : 0,039 <0,05). Le minimum a alors été identifié 22 jours après la mi-véraison. Tandis que celles situées en Côte de Nuits ont accusé un retard moyen de 11 jours (Régression p-value : 0,039 <0,05). Les dates du minimum de MaturOx des parcelles plantées dans des sols de type Rendosol ont été également retardées de 10 jours (Régression p-value : 0,03 <0,05). Enfin, les parcelles exposées Sud-Est (SE) ont subies un retard de 9 jours (Régression p-value : 0,044 <0,05) par rapport aux autres orientations. Les variables descriptives des parcelles telles que l'âge, l'altitude et le niveau d'appellation n'ont pas montrées d'influences significatives sur la variation de la date du minimum de MaturOx.

Par ailleurs, d'autres effets d'interactions ont été testés, notamment entre le type de sol et la concentration en sucre, en acidité totale ou en acide malique, dans l'hypothèse que le sol influence l'évolution de ces composés. Toutefois, aucune interaction significative n'a pu être démontrée.

Tableau 10 : Moyenne des paramètres de la maturité au moment du minimum de MaturOx et moyennes des évolutions par semaine avant et après cette date.

	Poids de 200 baies (g)			Sucre (g/L)			TAVP (%vol.)			AT (gH ₂ SO ₄ /L)			pH			Acide malique (g/L)			Azote assimilable (mg/L)		
	Instant t	avant	Après	Instant t	avant	Après	Instant t	avant	après	Instant t	avant	après	Instant t	avant	après	Instant t	avant	après	Instant t	avant	après
35	258	38	17	145	36	16	8,6	2,2	0,9	8,29	-3,81	-1,23	2,96	0,14	0,09	6,38	-4,63	-1,56	229,33	2,42	2,58
36	297	30	11	161	32	12	9,6	1,9	0,7	6,52	-3,50	-1,00	3,05	0,12	0,04	4,67	-4,18	-0,86	323,33	26,20	-44,67
37	298	35	-14	167	26	16	9,9	1,5	1,0	6,89	-2,78	-0,32	3,00	0,10	0,04	5,21	-3,53	-0,29	206,10	14,75	-11,13
38	319	22	0	166	24	16	9,9	1,4	1,0	7,44	-2,16	-0,85	3,00	0,11	0,10	5,82	-3,02	-2,98	208,00	11,13	-15,00
Moyenne	293	31	3	160	30	15	9,5	1,8	0,9	7,29	-3,06	-0,85	3,00	0,85	0,07	4,09	-3,83	-1,42	241,69	13,62	-17,16

Dans un troisième temps, les dynamiques d'évolution des différents facteurs de la maturité tout au long du processus de maturation, sur les variations des dates de minimum de MaturOx ont été investiguées. **L'hypothèse est que l'apparition du minimum de MaturOx pourrait être influencée par les cinétiques d'évolution** des paramètres de la maturité, plutôt que par les valeurs à l'instant où le minimum de MaturOx est détecté.

Pour cela, les évolutions moyennes de chaque paramètre, par semaine, ont été calculées, avant et après la date d'identification du minimum de MaturOx, Tableau 10.

Tout d'abord, **une augmentation importante du poids baies a été observée avant le minimum de MaturOx**, avec un accroissement moyen de 31g par semaine. **Après le minimum de MaturOx, un ralentissement de l'accroissement du poids des baies a été relevé** (Wilcoxon p-value : $5,6 \times 10^{-9} < 0,05$).

Les parcelles dont le minimum a été identifié en semaine 35 (S35) et 36 (S36) ont continué d'enregistrer une augmentation modérée du poids des baies de l'ordre de 15g par semaine, après la date du minimum de MaturOx. L'augmentation observée a pu être causée par un gonflement des baies, surtout dans les secteurs ayant été soumis à des épisodes pluvieux. Néanmoins, concernant les parcelles dont le minimum a été identifié les semaines 37 (S37) et 38 (S38), une stagnation ou une diminution du poids a été observée. Cela est probablement la conséquence du flétrissement des baies, lié à une perte d'eau et une diminution de l'accumulation de solutés dans la baie. En effet, les conditions climatiques des semaines 37, 38 et 39 ont favorisé la diminution du poids des baies. Beaucoup de vent asséchant et une forte dégradation de l'état sanitaire ont contribué au flétrissement des baies.

Ensuite, concernant le sucre, et par conséquent le TAVP, une évolution plus marquée avant qu'après le minimum de MaturOx a été remarquée (Wilcoxon p-value : $5,6 \times 10^{-8} < 0,05$). **Une augmentation de 1,5 à 2%vol. du TAVP par semaine a été observée avant le minimum de MaturOx.** Ensuite, **après la date du minimum de MaturOx, l'évolution du TAVP est restée modérée avec une hausse maximale de 1%vol. par semaine.** Ce **changement de dynamique** pourrait correspondre avec le ralentissement du déchargement phloémien et l'atteinte d'un plateau de chargement en sucre. Le taux du sucre continue d'augmenter légèrement par concentration, due à une perte d'eau lors du flétrissement.

Les cinétiques de concentration en sucre ont été plus importantes pour les parcelles dont le minimum de MaturOx a été observé durant les semaines 35 et 36. Cependant, au moment de la mesure du minimum de MaturOx, **les TAVP moyens étaient plus faibles pour ces parcelles que pour celles dont le minimum de MaturOx avait été identifié lors des semaines 37 et 38.**

Parallèlement, **l'acidité totale a présenté une forte diminution avant le minimum MaturOx, de l'ordre de 2 à 4 gH₂SO₄/L par semaine.** Ensuite, **après l'observation du minimum de MaturOx la diminution de l'AT a été moins marquée avec au maximum une perte de 1,5 gH₂SO₄/L par semaine** (Wilcoxon p-value : $6,05 \times 10^{-11} < 0,05$). **La diminution de l'acidité totale a été importante durant les semaines 34, 35 et 36.** Des cinétiques similaires à celles du TAVP ont été observées avec une plus forte dégradation des acides avant pour les parcelles dont le minimum de MaturOx a été déterminé plus précocement (S35 et S36).

Ainsi, les cinétiques d'évolution du sucre et de l'AT étaient variables durant les semaines de suivies et ont été impactées par les conditions météorologiques. Les parcelles où le **minimum de MaturOx a été détecté précocement** sont celles qui ont connu les **plus fortes variations des paramètres de la maturité à partir de la mi-véraison**. Toutefois, sur ces mêmes parcelles, **les minimums de MaturOx ont été observés avec des valeurs de TAVP faibles et d'AT élevées**. Cela est étonnant, car pour des parcelles présentant de fortes dynamiques de maturation, des TAVP élevés et des AT faibles étaient plutôt attendus.

Concernant le ratio S/A, une forte augmentation de ce ratio a été remarquée après la date d'apparition du minimum de MaturOx. Cette observation est la conséquence cumulée des tendances observées pour le sucre et l'acidité totale.

En outre, les analyses des baies ont révélé une **forte diminution de l'acide malique avant l'observation du minimum de MaturOx**, avec une perte de l'ordre de 3 et 6 g/L par semaine. **Tandis qu'après cette date, la dégradation était nettement plus faible** avec une perte inférieure à 2 g/L par semaine (Wilcoxon p-value <0,05). Par ailleurs, **un gradient de diminution de l'acide malique a été remarqué en fonction des secteurs géographiques des parcelles**. Les parcelles situées au Sud de la Bourgogne ont subi une dégradation de l'acide malique très importante avant la date du minimum de MaturOx. En revanche, les parcelles localisées plus au Nord, ont eu une perte d'acide malique limitée, sans doute préservé par des températures plus fraîches et moins d'ensoleillement.

Quant au pH, son évolution était plutôt stable avant et après l'observation du minimum de MaturOx avec une diminution de l'ordre de 0,1 points par semaine (Wilcoxon p-value >0,05). **Aucune différence de cinétique n'a été observé selon les dates de minimum de MaturOx identifiées ou encore selon la localisation des parcelles**. Tout comme pour l'indice PhenOx au pressurage, la valeur du pH et sa cinétique d'évolution ne semble pas influencer l'indice MaturOx. A ce stade, ce paramètre de la maturité ne permet pas d'apporter plus d'éléments de compréhension sur les variations des indices mesurés par voltamétrie.

Enfin, **les cinétiques d'évolution de l'azote assimilable diffèrent selon les dates d'observations du minimum de MaturOx**. **Pour la S35 une faible augmentation**, de l'ordre de 2mg/L par semaine, **avant et après le minimum de MaturOx a été observée** (Wilcoxon p-value >0,05). **Pour les S36, S37 et S38 avant le minimum de MaturOx, l'augmentation était plus importante**, avec environs 20 mg/L par semaine. **Puis, après le minimum de MaturOx une chute significative du Nass, de l'ordre de -15 à -40 mg/L par semaine a été enregistrée** (Wilcoxon p-value <0,05). Cette diminution pourrait-être attribuée à une réduction des apports exogènes d'azote à l'approche des vendanges, ou à une évolution de l'absorption et la consommation de l'azote par les baies. En effet, cela peut résulter d'une diminution de l'absorption de l'azote initialement utilisé pour la croissance et les activités photosynthétiques, à une dilution due à l'accroissement des autres solutés dans la baie, ou encore à une dégradation d'une partie de l'azote en protéines et autres composés organiques.

Ces analyses des cinétiques d'évolution des paramètres de la maturité avant et après la date du minimum de MaturOx semblent apporter de nouveaux éléments par rapport aux résultats obtenus pour les valeurs mesurées à l'instant t du minimum de MaturOx. Ainsi, l'analyse de ces évolutions dans le temps apporte un éclairage complémentaire sur les mécanismes à l'œuvre.

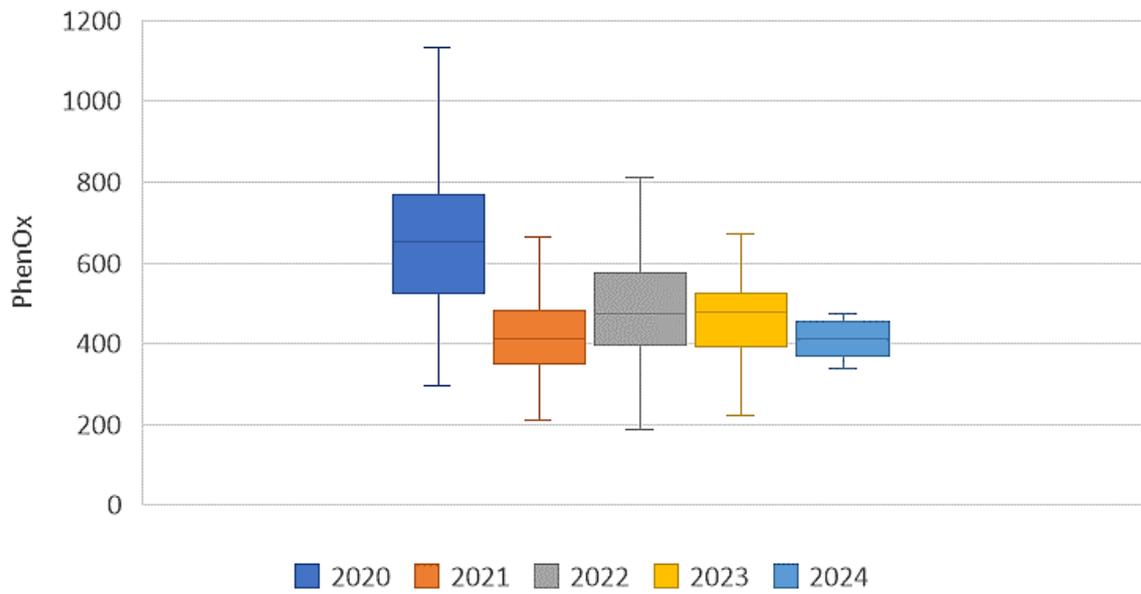


Figure 50 : Représentation multi-millésimes des PhenOx en cuve de débouillage.

De cette étude, le minimum de MaturOx apparait comment étant un moment charnière de l'évolution des composés, avec des cinétiques de concentration ou de déconcentration différentes avant et après cette date. Ainsi, le MaturOx permet d'identifier une date clé à partir de laquelle la capacité d'évolution de la maturité des baies est ralentie.

Le suivi de cet indice pourrait être utile au viticulteur, en complément des analyses plus classiques, pour renseigner sur la capacité de maturation des parcelles et prédire au mieux les dates de vendanges en fonction des concentrations en sucre et acidité visées.

Enfin, ultérieurement, **étudier les corrélations entre la date du minimum de MaturOx et la date de récolte, associée aux données de maturité lors de la récolte serait pertinent.** En effet, la date de récolte est généralement choisie en fonction de la concentration en sucre et de l'acidité totale, bien que cela dépende du produit final souhaité et des réglementations en vigueur (droit ou non à la chaptalisation ou à l'acidification par exemple). L'analyse de la relation entre la date du minimum de MaturOx, la date de récolte et les paramètres de la maturité à ces différents moments permettrait de comprendre l'évolution des composés lors de la dernière phase de maturation des baies.

A ce jour, les dates de récoltes des parcelles suivies n'ont pas encore été communiquées par les membres du réseau VOLTA, ne permettant pas de réaliser le traitement de données. Cependant, une fois les dates de récoltes recueillies, les analyses permettraient certainement une meilleure compréhension des dynamiques de la maturation et pourraient également contribuer à optimiser davantage les stratégies de récoltes.

4. Croisement des données avec les mesures aux différents stades de l'itinéraire technique

Certaines parcelles du suivi maturité sont vinifiées et seront élevées en parcellaire. Des mesures de l'indice PhenOx lors du pressurage et du débordage ont été faites, et des mesures de l'indice TE lors de l'élevage seront réalisées. Cela permettra de réaliser un suivi complet, de la maturation jusqu'après la mise en bouteille, et d'établir de réels liens entre la matière première et le produit fini.

Les premières mesures de l'indice PhenOx sur les moûts, lors du débordage ont permis d'observer que les PhenOx étaient relativement faibles en 2024, avec des valeurs proches de 2022 et 2023, plus faibles qu'en 2020, mais légèrement plus élevées qu'en 2021, Figure 50. Néanmoins, le peu de données actuellement collectées n'a pas permis d'identifier d'éventuelles corrélations avec les données de l'essai maturité. Quand plus de mesures auront été réalisées, les données pourront être analysées.

En parallèle, les moûts issues des parcelles suivies ont été prélevés à la fin du débordage et ont été envoyés pour des analyses visant à détecter les précurseurs des composés aromatiques typiques des défauts d'oxydation. Ensuite, à différents intervalles de temps, lorsque les mesures de l'indice TE seront réalisées au cours de l'élevage, ces mêmes vins seront re-envoyés pour analyses chimiques. Ainsi, des liens entre la maturité, la date du minimum de MaturOx, la date de vendange, les niveaux de PhenOx au débordage et l'indice TE lors de l'élevage, ainsi que la composition en précurseurs et molécules des défauts d'oxydation pourront être identifiés. De ce fait, l'impact de la maturité sur la construction du potentiel de longévité des vins pourra être établi.

CONCLUSION

Ces dernières années, le suivi de l'indice PhenOx à l'aide du PolyScan a permis de renseigner sur les composés oxydables présents dans le vin aux différentes étapes de l'itinéraire technique. Lors du pressurage, trois catégories de pressoir ont été distinguées en fonction des cinétiques d'extraction des composés phénoliques. Ces cinétiques semblaient dépendre des niveaux de maturité des baies, comme l'ont montré les premières données collectées. De plus, des corrélations ont été établies entre les cinétiques d'extractions lors du pressurage et les niveaux de PhenOx mesurés en cuve de débourbage, ainsi qu'avec l'indice TE au cours de l'élevage, soulignant l'influence des maturités sur ces processus.

En 2024, l'étude menée s'est concentrée davantage sur la maturité des baies avec l'introduction de l'indice MaturOx. L'objectif était d'évaluer si cet indice permettait de mieux caractériser et comprendre la maturation afin de pouvoir explorer l'impact de la maturité des baies à la récolte sur les cinétiques d'extractions des composés phénoliques au pressurage, sur les niveaux de PhenOx mesurés au débourbage et sur l'influence sur la sensibilité ou de la résistance des vins vis-à-vis de l'oxydation au cours de l'élevage.

L'étude de la maturation des baies de raisin a été réalisée sur 40 parcelles de Chardonnay blanc, en Bourgogne, en utilisant divers paramètres analytiques de la maturité ainsi que l'indice MaturOx. La mesure hebdomadaire de cet indice a permis de déterminer une date clé, le minimum de MaturOx. Ce point critique apparaît comme essentiel pour mieux comprendre la dynamique de maturation des baies. En effet, les analyses faites ont révélé que le moment où ce minimum est atteint varie en fonction des conditions géographiques (localisation, sol, exposition) des parcelles mais aussi des cinétiques d'évolution des paramètres tels que le sucre, l'acidité totale et d'autres composés... En effet, un gradient Sud-Nord a été observé, ainsi qu'un ralentissement des cinétiques d'évolution des paramètres de la maturité avant et après cette date clé. En revanche, l'observation du minimum de MaturOx n'était pas directement liée à une seule et unique variable. Ainsi, les résultats obtenus ont montré l'intérêt de l'indice MaturOx comme indicateur complémentaire pour évaluer la maturité des raisins.

Par ailleurs, un suivi des parcelles dans le temps, aux différentes étapes de l'itinéraire technique permettra de mieux comprendre la construction du potentiel de longévité. Les données obtenues sur la maturité et l'indice MaturOx pourront être croisées avec les mesures des indices PhenOx au débourbage et l'indice TE lors de l'élevage, ainsi qu'avec les résultats d'analyses des composés et molécules précurseurs de l'oxydation réalisées en parallèle.

Enfin, ces dernières années des essais ont été menés sur du Sauvignon blanc et ont permis d'établir des corrélations entre le taux de sucre mesurés lors du minimum de MaturOx et les profils aromatiques des vins finaux. Un faible taux de sucre au moment du minimum était associé à des vins plus structurés, tandis que des taux de sucre élevés révélaient de la complexité. Dans cette même perspective, à partir des données collectées sur les parcelles d'études, l'analyse des relations entre les taux de sucres mesurés au moment du minimum de MaturOx et les profils aromatiques des vins finaux serait intéressante. Si des tendances sont observées pour le Chardonnay comme pour le Sauvignon, alors l'indice MaturOx permettait d'enrichir les informations fournies par les indicateurs classiques de la maturité, offrant une approche supplémentaire sur la construction du potentiel aromatique et la qualité des vins.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allegro, G., Pastore, C., Valentini, G., Muzzi, E., & Filippetti, I. (2016). Influence of berry ripeness on accumulation, composition and extractability of skin and seed flavonoids in cv. Sangiovese (*Vitis vinifera* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(13), 4553-4559. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7672>
- Ancín-Azpilicueta, C., González-Marco, A., & Jiménez-Moreno, N. (2009). Evolution of esters in aged Chardonnay wines obtained with different vinification methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(14), 2446-2451. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3744>
- Andreasen, A. A., & Stier, T. J. B. (1953). Anaerobic nutrition of *Saccharomyces cerevisiae*. I. Ergosterol requirement for growth in a defined medium. *Journal of Cellular and Comparative Physiology*, 41(1), 23-36. <https://doi.org/10.1002/jcp.1030410103>
- Antalick, G., Šuklje, K., Blackman, J. W., Schmidtke, L. M., & Deloire, A. (2021). Performing sequential harvests based on berry sugar accumulation (mg/berry) to obtain specific wine sensory profiles. *OENO One*, 55(2), Article 2. <https://doi.org/10.20870/oenone.2021.55.2.4527>
- Arias-Pérez, I., Ferrero-Del-Teso, S., Sáenz-Navajas, M. P., Fernández-Zurbano, P., Lacau, B., Astarain, J., Barón, C., Ferreira, V., & Escudero, A. (2020). Some clues about the changes in wine aroma composition associated to the maturation of “neutral” grapes. *Food Chemistry*, 320, 126610. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126610>
- Avramescu, A., Andreescu, S., Noguer, T., Bala, C., Andreescu, D., & Marty, J.-L. (2002). Biosensors designed for environmental and food quality control based on screen-printed graphite electrodes with different configurations. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 374(1), 25-32. <https://doi.org/10.1007/s00216-002-1312-0>
- Barriault, E., Turcotte, I., & Bergeron, K. (2018). *Flétrissement des baies de raisin et dessèchement de la rafle*. Agri réseau. https://www.agrireseau.net/documents/Document_98142.pdf
- Barril, C., Rutledge, D. n., Scollary, G. r., & Clark, A. c. (2016). Ascorbic acid and white wine production : A review of beneficial versus detrimental impacts. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22(2), 169-181. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12207>
- Benzie, I. F. F., & Devaki, M. (2018). The ferric reducing/antioxidant power (FRAP) assay for non-enzymatic antioxidant capacity : Concepts, procedures, limitations and applications. In *Measurement of Antioxidant Activity & Capacity* (p. 77-106). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119135388.ch5>
- Bergler, G. (2020). *Production d'arômes non-conventionnels par les levures au cours de la fermentation œnologique* [Phdthesis]. Montpellier SupAgro.
- Biau, S. (1996). *Etude de la matière colorante des vins blancs de Bordeaux* [These de doctorat]. Bordeaux 2.
- BIVB. (2018). *Le vieillissement prématuré des vins blancs—Ce qu'il faut savoir* [Publication technique]. https://extranet.bivb.com/technique-et-qualite/publications-techniques/plaquettes-techniques/gallery_files/site/2992/48177/49718.pdf
- BIVB. (2020). *Longévité des vins blancs—Réseau VOLTA Campagne 2020* (p. 5) [Rapport d'essai]. BIVB. https://extranet.bivb.com/technique-et-qualite/projet-en-cours/gallery_files/site/2992/48177/65226.pdf
- BIVB. (2022a). *Les chiffres clés de la Bourgogne viticole*. Vins de Bourgogne. https://www.vins-bourgogne.fr/boutique/gallery_files/site/72878/72880.pdf

- BIVB. (2022b). *Longévité des vins blancs. Résultats de trois années d'étude au sein du réseau VOLTA 2020 – 2021 – 2022* [Rapport d'essai]. BIVB.
https://extranet.bivb.com/gallery_files/site/2992/48177/74932.pdf
- Blaise, A., Pacaud, M., Pauly, M., & Pissard, A. (2005). Le bâtonnage : Technique novatrice dans l'élevage des vins. *Revue des Œnologues*, 117, 58-61.
<https://search.oeno.tm.fr/search/article/AVprq3sbYaAqBff0BqUe>
- Blancard, D., & Deluche. (2018). *Rayonnement solaire et chaleur*. Ephytia INRAe.
<https://ephytia.inra.fr/fr/C/7064/Vigne-Rayonnement-solaire-et-chaleur>
- Botezatu, A., Kotseridis, Y., Inglis, D., & Pickering, G. (2016). *A survey of methoxypyrazines in wine*. 14, 24-29.
- Brenon, E., Panigai, S., Brosseau, D., Pascal, C., & Mahé, H. (2024). Extraction des polyphénols au cours du pressurage des raisins de Chardonnay en Bourgogne, impact des opérations pré-pressurage et conséquences en cuve de débourbage—Infowine.com. *Infowine - revue en ligne*.
- Bustamante, M., Gimenez, P., Just-Borràs, A., Solé-Clua, I., Gombau, J., Heras, J., Sieczkowski, N., Gil i Cortiella, M., Canals, J.-M., & Zamora, F. (2024). Inoculation with a selected strain of *Metschnikowia pulcherrima* as a bioprotective alternative to sulphites for preventing browning of white grape must. *OENO One*, 58. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2024.58.1.7830>
- Capone, Barker, A., Williamson, P. o., & Francis, I. I. (2018). The role of potent thiols in Chardonnay wine aroma. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 24(1), 38-50.
<https://doi.org/10.1111/ajgw.12294>
- Capone, Sefton, M. A., Hayasaka, Y., & Jeffery, D. W. (2010). Analysis of precursors to wine odorant 3-mercaptohexan-1-ol using HPLC-MS/MS : Resolution and quantitation of diastereomers of 3-S-cysteinylhexan-1-ol and 3-S-glutathionylhexan-1-ol. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(3), 1390-1395. <https://doi.org/10.1021/jf903720w>
- Carando, S., Teissedre, P. L., Pascual-Martinez, L., & Cabanis, J. C. (1999). Levels of flavan-3-ols in French wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(10), 4161-4166.
<https://doi.org/10.1021/jf9810564>
- Carbonneau, A., Torregrosa, L., Deloire, A., Pellegrino, A., Jaillard, B., Métay, A., Ojeda, H., Lebon, E., & Abbal, P. (2020). *Traité de la vigne* (3e édition). Dunod.
- Carpena, M., Pereira, A. G., Prieto, M. A., & Simal-Gandara, J. (2020). Wine Aging Technology : Fundamental Role of Wood Barrels. *Foods*, 9(9), 1160.
<https://doi.org/10.3390/foods9091160>
- Cejudo-Bastante, M. J., Hermosín-Gutiérrez, I., Castro-Vázquez, L. I., & Pérez-Coello, M. S. (2011). Hyperoxygenation and Bottle Storage of Chardonnay White Wines : Effects on Color-Related Phenolics, Volatile Composition, and Sensory Characteristics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8), 4171-4182. <https://doi.org/10.1021/jf104744q>
- Chevion, S., Chevion, M., Chock, P. B., & Beecher, G. R. (1999). Antioxidant capacity of edible plants : Extraction protocol and direct evaluation by cyclic voltammetry. *Journal of Medicinal Food*, 2(1), 1-10. <https://doi.org/10.1089/jmf.1999.2.1>
- Cheynier, V., Basire, N., & Rigaud, J. (1989). Mechanism of trans-caffeoyltartaric acid and catechin oxidation in model solutions containing grape polyphenoloxidase. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 37(4), 1069-1071. <https://doi.org/10.1021/jf00088a055>
- Cheynier, V., Owe, C., & Rigaud, J. (1988). Oxidation of Grape Juice Phenolic Compounds in Model Solutions. *Journal of Food Science*, 53(6), 1729-1732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb07828.x>

- Cheyrier, V., Rigaud, J., Souquet, J.-M., Duprat, F., & Moutounet, M. (1990). Must Browning in Relation to the Behavior of Phenolic Compounds During Oxidation. *American Journal of Enology and Viticulture*, 41(4), 346-349. <https://doi.org/10.5344/ajev.1990.41.4.346>
- Cheyrier, V., & Van Hulst, M. W. J. (1988). Oxidation of trans-caftaric acid and 2-S-glutathionylcaftaric acid in model solutions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 36(1), 10-15. <https://doi.org/10.1021/jf00079a003>
- Chiesa, G. (2020). Résultats préliminaires du projet Oxyless et potentiel de la voltammétrie pour prédire l'oxydabilité des vins. *Infowine - revue en ligne*. <https://www.infowine.com/fr/resultats-preliminaires-du-projet-oxyless-et-potentiel-de-la-voltammetrie-pour-predire-loxydabilite-des-vins/>
- Chiorcea-Paquim, A.-M., Enache, T. A., De Souza Gil, E., & Oliveira-Brett, A. M. (2020). Natural phenolic antioxidants electrochemistry : Towards a new food science methodology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 1680-1726. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12566>
- Chira, K., Suh, J., Saucier, C., & Teissedre, P.-L. (2008). Les polyphénols du raisin. *Phytothérapie*, 6, 75-82. <https://doi.org/10.1007/s10298-008-0293-3>
- Clarke, S., Bosman, G., du Toit, W., & Aleixandre-Tudo, J. L. (2022). White wine phenolics : Current methods of analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(1), 7-25. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12120>
- Conde, C., Silva, P., Fontes, N., Dias, A. C. P., Tavares, R. M., Sousa, M. J., Agasse, A., Delrot, S., & Gerós, H. (2007). Biochemical Changes throughout Grape Berry Development and Fruit and Wine Quality. *Food*, 22.
- Cooke, R., Capone, D., van Leeuwen, K., Elsey, G., & Sefton, M. (2009). Quantification of several 4-alkyl substituted gamma-lactones in Australian wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(2), 348-352. <https://doi.org/10.1021/jf8026974>
- Culleré, L., Cacho, J., & Ferreira, V. (2007). An assessment of the role played by some oxidation-related aldehydes in wine aroma. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(3), 876-881. <https://doi.org/10.1021/jf062432k>
- Dai, Z. W., Ollat, N., Gomès, E., Decroocq, S., Tandonnet, J.-P., Bordenave, L., Pieri, P., Hilbert, G., Kappel, C., Leeuwen, C. van, Vivin, P., & Delrot, S. (2011). Ecophysiological, Genetic, and Molecular Causes of Variation in Grape Berry Weight and Composition : A Review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 62(4), 413-425. <https://doi.org/10.5344/ajev.2011.10116>
- Danilewicz, J. C. (2003). Review of Reaction Mechanisms of Oxygen and Proposed Intermediate Reduction Products in Wine : Central Role of Iron and Copper. *American Journal of Enology and Viticulture*, 54(2), 73-85. <https://doi.org/10.5344/ajev.2003.54.2.73>
- Danilewicz, J. C. (2021). Toward Understanding the Mechanism of Wine Oxidation. *American Journal of Enology and Viticulture*. <https://doi.org/10.5344/ajev.2021.21008>
- De Beer, D., Harbertson, J., Kilmartin, P., Roginsky, V., Barsukova, T., Adams, D., & Waterhouse, A. (2004). Phenolics : A Comparison of Diverse Analytical Methods. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55, 389-400. <https://doi.org/10.5344/ajev.2004.55.4.389>
- Deloire, A. (2010). Grapevine berry morphology and composition : A review. *Wineland Magazine, YearBook*, 104-119.
- Deloire, A. (2011). The concept of berry sugar loading. *Wineland*, 257, 93-95.
- Deloire, A. (2012). Grapevine berry ripening and wine aroma. *Stellenbosch University*.
- Deloire, A., Kraeva, E., Martin, M., & Hunter, J. (2017). Sugar Loading and Phenolic Accumulation as Affected by Ripeness Level of Syrah/R99 Grapes. *IVES Conference Series, Terroir 2004*,

515-521. https://ives-openscience.eu/wp-content/uploads/2022/01/Sugar_Loading_Deloire.pdf

- Deloire, A., Rogiers, S., Antalick, G., & Pellegrino, A. (2020). Berry primary and secondary metabolites in response to sunlight and temperature in the grapevine fruit zone. *IVES Technical Reviews, Vine and Wine*. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2020.4498>
- Deloire, A., Rogiers, S., Šuklje, K., Antalick, G., Zeyu, X., & Pellegrino, A. (2021). Grapevine berry shrivelling, water loss and cell death : An increasing challenge for growers in the context of climate change : Original language of the article: English. *IVES Technical Reviews, Vine and Wine*. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2021.4615>
- Devatine, A., Chiciuc, I., & Mietton-Peuchot, M. (2011). The protective role of dissolved carbon dioxide against wine oxidation : A simple and rational approach. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 45, 189-197. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2011.45.3.1494>
- Dico du vin. (2011). Longévité (durée de vie d'un vin). In *Dico du vin, le dictionnaire du vin*. <https://dico-du-vin.com/longevite-duree-de-vie-dun-vin/>
- Elias, R. J., Andersen, M. L., Skibsted, L. H., & Waterhouse, A. L. (2009). Identification of Free Radical Intermediates in Oxidized Wine Using Electron Paramagnetic Resonance Spin Trapping. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(10), 4359-4365. <https://doi.org/10.1021/jf8035484>
- Enzell, C. R. (1985). Biodegradation of carotenoids—An important route to aroma compounds. *Pure and Applied Chemistry*, 57(5), 693-700. <https://doi.org/10.1351/pac198557050693>
- Escudero, A., Arias, I., Lacau, B., Astraín, J., Barón, C., Fernandez-Zurbano, P., & Ferreira, V. (2019). Effects of vineyard 'potential' and grape maturation on the aroma-volatile profile of Grenache wines. *OENO One*, 53(4), Article 4. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.4.2381>
- Escudero, A., Hernández-Orte, P., Cacho, J., & Ferreira, V. (2000). Clues about the role of methional as character impact odorant of some oxidized wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(9), 4268-4272. <https://doi.org/10.1021/jf991177j>
- Fang, Y., & Qian, M. C. (2006). Quantification of Selected Aroma-Active Compounds in Pinot Noir Wines from Different Grape Maturities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(22), 8567-8573. <https://doi.org/10.1021/jf061396m>
- Fernandez-Zurbano, P., Ferreira, V., Escudero, A., & Cacho, J. (1998). Role of Hydroxycinnamic Acids and Flavanols in the Oxidation and Browning of White Wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(12), 4937-4944. <https://doi.org/10.1021/jf980491v>
- Fernandez-Zurbano, P., Ferreira, V., Pena, C., Escudero, A., Serrano, F., & Cacho, J. (1995). Prediction of Oxidative Browning in White Wines as a Function of Their Chemical Composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43(11), 2813-2817. <https://doi.org/10.1021/jf00059a008>
- Ferreira, V., & Bueno, M. (2015). New Insights into the Chemistry Involved in Aroma Development during Wine Bottle Aging : Slow Redox Processes and Chemical Equilibrium Shifts. In *Advances in Wine Research* (Vol. 1203, p. 275-289). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2015-1203.ch017>
- Ferreira, V., Fernandes, F., Carrasco, D., Hernandez, M. G., Pinto-Carnide, O., Arroyo-García, R., Andrade, P., Valentão, P., Falco, V., & Castro, I. (2017). Spontaneous variation regarding grape berry skin color : A comprehensive study of berry development by means of biochemical and molecular markers. *Food Research International*, 97, 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.050>

- Ferrer-Gallego, R., Brás, N. F., García-Estévez, I., Mateus, N., Rivas-Gonzalo, J. C., de Freitas, V., & Escribano-Bailón, M. T. (2016). Effect of flavonols on wine astringency and their interaction with human saliva. *Food Chemistry*, 209, 358-364. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.091>
- Ferrero-del-Teso, S., Arias, I., Escudero, A., Ferreira, V., Fernández-Zurbano, P., & Sáenz-Navajas, M.-P. (2020). Effect of grape maturity on wine sensory and chemical features : The case of Moristel wines. *LWT*, 118, 108848. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108848>
- Flanzy, C. (1998). *Oenologie fondements scientifiques et technologiques*. Lavoisier Tec & Doc.
- Fornairon-Bonnefond, C., Demaretz, V., Rosenfeld, E., & Salmon, J.-M. (2002). Oxygen addition and sterol synthesis in *Saccharomyces cerevisiae* during enological fermentation. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 93(2), 176-182. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(02\)80011-1](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(02)80011-1)
- Fulcrand, H., Cheynier, V., Oszmianski, J., & Moutounet, M. (1997). An oxidized tartaric acid residue as a new bridge potentially competing with acetaldehyde in flavan-3-OL condensation. *Phytochemistry*, 46(2), 223-227. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(97\)00276-8](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(97)00276-8)
- Fulcrand, H., Doco, T., Es-Safi, N.-E., Cheynier, V., & Moutounet, M. (1996). Study of the acetaldehyde induced polymerisation of flavan-3-ols by liquid chromatography-ion spray mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 752(1), 85-91. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(96\)00485-2](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(96)00485-2)
- Furtado, I., Lopes, P., Oliveira, A. S., Amaro, F., Bastos, M. de L., Cabral, M., Guedes de Pinho, P., & Pinto, J. (2021). The Impact of Different Closures on the Flavor Composition of Wines during Bottle Aging. *Foods*, 10(9), 2070. <https://doi.org/10.3390/foods10092070>
- Gambetta, J. M., Bastian, S. E. P., Cozzolino, D., & Jeffery, D. W. (2014). Factors influencing the aroma composition of Chardonnay wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(28), 6512-6534. <https://doi.org/10.1021/jf501945s>
- Gammacurta, M., Gros, J., Lavigne Cruège, V., Nazaris, B., Moine, V., Darriet, P., & Marchal, A. (2019). Recherches sur la typicité des vins de Chardonnay de Bourgogne. Identification et quantification de nouveaux marqueurs de l'arôme de noisette. *La revue des oenologues et des techniques vitivinicoles et oenologiques*, 173, 26-29.
- Gammacurta, M., Lavigne, V., Moine, V., Darriet, P., & Marchal, A. (2022). *Contribution of grape and oak wood barrels to pyrrole content in wines – Influence of several cooperage parameters*. IVES Conference series - IVAS 2022.
- Gerós, H., Chaves, M., & Delrot, S. (2012). *The Biochemistry of the Grape Berry*. Bentham Science Publishers.
- Giacosa, S., Río Segade, S., Cagnasso, E., Caudana, A., Rolle, L., & Gerbi, V. (2019). SO₂ in Wines. In A. Morata (Éd.), *Red Wine Technology* (p. 309-321). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814399-5.00021-9>
- Giménez, P., Just-Borras, A., Pons, P., Gombau, J., Heras, J. M., Sieczkowski, N., Canals, J. M., & Zamora, F. (2023). Biotechnological tools for reducing the use of sulfur dioxide in white grape must and preventing enzymatic browning : Glutathione; inactivated dry yeasts rich in glutathione; and bioprotection with *Metschnikowia pulcherrima*. *European Food Research and Technology*, 249(6), 1491-1501. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04229-6>
- González-Centeno, M. R., Chira, K., & Teissedre, P. L. (2019). Use of oak wood during malolactic fermentation and ageing : Impact on chardonnay wine character. *Food Chemistry*, 278, 460-468. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.049>

- Granès, D., Marchet, Bonnefond, & Sanchez. (2019). Ethanal : Un paramètre clef de pilotage analytique et sensoriel. *Groupe ICV*.
- Gros, J., Lavigne, V., Thibaud, F., Gammacurta, M., Moine, V., Dubourdieu, D., Darriet, P., & Marchal, A. (2017). Toward a Molecular Understanding of the Typicality of Chardonnay Wines : Identification of Powerful Aromatic Compounds Reminiscent of Hazelnut. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(5), 1058-1069. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04516>
- Guchu, E., Díaz-Maroto, M. C., Pérez-Coello, M. S., González-Viñas, M. A., & Ibáñez, M. D. C. (2006). Volatile composition and sensory characteristics of Chardonnay wines treated with American and Hungarian oak chips. *Food Chemistry*, 99(2), 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.050>
- Guillaumie, S., Fouquet, R., Kappel, C., Camps, C., Terrier, N., Moncomble, D., Dunlevy, J. D., Davies, C., Boss, P. K., & Delrot, S. (2011). Transcriptional analysis of late ripening stages of grapevine berry. *BMC Plant Biology*, 11(1), 165. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-11-165>
- Gunata, Y. Z., Bayonove, C. L., Baumes, R. L., & Cordonnier, R. E. (1985). The aroma of grapes I. Extraction and determination of free and glycosidically bound fractions of some grape aroma components. *Journal of Chromatography A*, 331, 83-90. [https://doi.org/10.1016/0021-9673\(85\)80009-1](https://doi.org/10.1016/0021-9673(85)80009-1)
- Guyot, S., Vercauteren, J., & Cheynier, V. (1996). Structural determination of colourless and yellow dimers resulting from (+)-catechin coupling catalysed by grape polyphenoloxidase. *Phytochemistry*, 42(5), 1279-1288. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(96\)00127-6](https://doi.org/10.1016/0031-9422(96)00127-6)
- Hapiot, P., Neudeck, A., Pinson, J., Fulcrand, H., Neta, P., & Rolando, C. (1996). Oxidation of caffeic acid and related hydroxycinnamic acids. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 405(1), 169-176. [https://doi.org/10.1016/0022-0728\(95\)04412-4](https://doi.org/10.1016/0022-0728(95)04412-4)
- Infowine (Réalisateur). (2021). *Oxyless—Estimer l'oxydabilité des vins rapidement avec des méthodes analytiques et voltammétrie* [Enregistrement vidéo]. <https://www.youtube.com/watch?v=MtzluxGfa5g>
- ISO 17 025 - Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais, Norme ISO/IEC 17025:2017 (2017).
- ISO 5725-1 - Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure, Norme ISO 5725-1:2023 19 (2023).
- Jaffré, J., Valentin, D., Meunier, J.-M., Siliani, A., Bertuccioli, M., & Le Fur, Y. (2011). The Chardonnay wine olfactory concept revisited : A stable core of volatile compounds, and fuzzy boundaries. *Food Research International*, 44(1), 456-464. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.022>
- Jouin, A. (2019). *Évolution et caractérisation chimique des tanins couronnes du raisin au vin*. <https://theses.hal.science/tel-03696540/>
- Kennedy, J. (2002). Understanding berry development. *Practical Winery and Vineyard*, 24.
- Kohen, R., Vellaichamy, E., Hrbac, J., Gati, I., & Tirosh, O. (2000). Quantification of the overall reactive oxygen species scavenging capacity of biological fluids and tissues. *Free Radical Biology & Medicine*, 28(6), 871-879. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(00\)00191-x](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(00)00191-x)
- König, T., Gutsche, B., Hartl, M., Hübscher, R., Schreier, P., & Schwab, W. (1999). 3-Hydroxy-4,5-dimethyl-2(5H)-furanone (Sotolon) Causing an Off-Flavor : Elucidation of Its Formation Pathways during Storage of Citrus Soft Drinks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(8), 3288-3291. <https://doi.org/10.1021/jf981244u>

- Kritzinger, E. C., Bauer, F. F., & du Toit, W. J. (2013). Role of Glutathione in Winemaking : A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(2), 269-277. <https://doi.org/10.1021/jf303665z>
- Lacey, M. J., Allen, M. S., Harris, R. L. N., & Brown, W. V. (1991). Methoxypyrazines in Sauvignon blanc Grapes and Wines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 42(2), 103-108. <https://doi.org/10.5344/ajev.1991.42.2.103>
- Larousse. (2024). *Définitions : Longévité*. Dictionnaire de français Larousse.
- Lavigne, V., Pons, A., Darriet, P., & Dubourdieu, D. (2008). Changes in the Sotolon Content of Dry White Wines during Barrel and Bottle Aging. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(8), 2688-2693. <https://doi.org/10.1021/jf072336z>
- Leigh, F., Capone, D., Siebert, T., Barker, S., Barker, A., & Williamson, P. (2016). *Insights into flavour and aroma compounds in Chardonnay*.
- Li, H., Guo, A., & Wang, H. (2008). Mechanisms of oxidative browning of wine. *Food Chemistry*, 108(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.065>
- López, R., Geffroy, O., Gracia-Moreno, E., Zapata, J., Ferreira, V., Serrano, E., & Cacho, J. (s. d.). *Principales adquisicions sur le potentiel aromatique des quatre cépages étudiés*.
- Lorrain, B., Ballester, J., Thomas-Danguin, T., Blanquet, J., Meunier, J. M., & Le Fur, Y. (2006). Selection of Potential Impact Odorants and Sensory Validation of Their Importance in Typical Chardonnay Wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(11), 3973-3981. <https://doi.org/10.1021/jf052350g>
- Lunte, S. M., Blankenship, K. D., & Read, S. A. (1988). Detection and identification of procyanidins and flavanols in wine by dual-electrode liquid chromatography-electrochemistry. *Analyst*, 113(1), 99-102. <https://doi.org/10.1039/AN9881300099>
- Luo, J., Brotchie, J., Pang, M., Marriott, P., Howell, K., & Zhang, P. (2019a). Dataset of concentrations of free terpenes at different phenological stages in *Vitis vinifera* L. Shiraz, Cabernet Sauvignon, Riesling, Chardonnay and Pinot Gris. *Data in Brief*, 27, 30-31. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104595>
- Luo, J., Brotchie, J., Pang, M., Marriott, P. J., Howell, K., & Zhang, P. (2019b). Free terpene evolution during the berry maturation of five *Vitis vinifera* L. cultivars. *Food Chemistry*, 299, 125101. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125101>
- Makhotkina, O., & Kilmartin, P. A. (2013). Electrochemical Oxidation of Wine Polyphenols in the Presence of Sulfur Dioxide. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(23), 5573-5581. <https://doi.org/10.1021/jf400282z>
- Marais, J., Van Wyk, C., & Rapp, A. (1991). *Carotenoid levels in maturing grapes as affected by climatic regions, sunlight and shade*.
- Márquez, K., Pérez-Navarro, J., Hermosín-Gutiérrez, I., Gómez-Alonso, S., Mena-Morales, A., García-Romero, E., & Contreras, D. (2019). Systematic study of hydroxyl radical production in white wines as a function of chemical composition. *Food Chemistry*, 288, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.005>
- Masa, A., & Vilanova, M. (2008). Flavonoid and aromatic characterisation of cv. Albarín blanco (*Vitis vinifera* L.). *Food Chemistry*, 107, 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.08.014>
- Mathew, & Parpia. (1971). Food Browning as a Polyphenol Reaction. In Chichester, Mrak, & Stewart (Éds.), *Advances in Food Research* (Vol. 19, p. 75-145). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2628\(08\)60031-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2628(08)60031-2)
- McManus, J., Davis, K., Beart, J., Gaffney, S., Lilley, T., & Haslam, E. (1985). Polyphenol interactions. Part 1. Introduction; some observations on the reversible complexation of

- polyphenols with proteins and polysaccharides. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2*, 9, 1429-1438. <https://doi.org/10.1039/P29850001429>
- Météo France. (2024). *Bilan climatique du printemps 2024 : Le 4e printemps le plus arrosé jamais enregistré*. Météo France. <https://meteofrance.fr/actualite/presse/bilan-climatique-du-printemps-2024-le-4e-printemps-le-plus-arrose>
- Monamy, C., & Chambre d'Agriculture. (2024). *Observatoire du millésime—BSV*. Bulletin de Santé du végétal de Bourgogne Franche Comté.
- Mouls. (2024). *Support de cours UE5—Les Polyphenols*.
- Nikolantonaki, M. (2010). *Incidence de l'oxydation des composés phénoliques sur la composante aromatique des vins blancs*. <https://hal.inrae.fr/tel-02822503/document>
- Nikolantonaki, M., Daoud, S., Noret, L., Coelho, C., Badet-Murat, M.-L., Schmitt-Kopplin, P., & Gougeon, R. D. (2019). Impact of Oak Wood Barrel Tannin Potential and Toasting on White Wine Antioxidant Stability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(30), 8402-8410. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00517>
- Nikolantonaki, M., Romanet, R., Lucio, M., Schmitt-Kopplin, P., & Gougeon, R. (2022). Sulfonation Reactions behind the Fate of White Wine's Shelf-Life. *Metabolites*, 12(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/metabo12040323>
- Nikolantonaki, M., & Waterhouse, A. L. (2012). A Method To Quantify Quinone Reaction Rates with Wine Relevant Nucleophiles : A Key to the Understanding of Oxidative Loss of Varietal Thiols. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(34), 8484-8491. <https://doi.org/10.1021/jf302017j>
- Nunes, P., Muxagata, S., Correia, A. C., Nunes, F. M., Cosme, F., & Jordão, A. M. (2017). Effect of oak wood barrel capacity and utilization time on phenolic and sensorial profile evolution of an Encruzado white wine. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(14), 4847-4856. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8355>
- OIV. (2023). *Recueil des méthodes internationales d'analyse des vins et moûts*.
- Padilla-González, G. F., Grosskopf, E., Sadgrove, N. J., & Simmonds, M. S. J. (2022). Chemical Diversity of Flavan-3-Ols in Grape Seeds : Modulating Factors and Quality Requirements. *Plants*, 11(6), 809. <https://doi.org/10.3390/plants11060809>
- Panigai, S. (2020). *Évaluation du risque d'oxydation prématurée des vins blancs de Bourgogne par voltamétrie linéaire de balayage et impacts de différents itinéraires techniques* [Rapport de stage]. https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03641109v1/file/2020_Viti-Oeno_Panigai.pdf
- Pascal, C. (2020). Oxydation, potentiel rédox, oxydabilité des vins : De la théorie à la pratique. *Vinventions*. <https://eu.vinventions.com/fr/challenges/technical-article/oxydation-potentiel-redox-oxydabilite-des-vins-de-la-theorie-a-la-pratique/>
- Pascal, C., Champeau, Charpentier, Diéval, & Vidal. (2020). Méthode électrochimique pour la mesure en temps réel des polyphénols au cours de la vinification. *Infowine - revue en ligne*. https://www.infowine.com/fr/articles_techniques/methode_electrochimique_pour_la_mesure_en_temps_reel_des_polyphenols_au_cours_de_la_vinification_sc_18390.htm
- Pisoschi, A. M., & Negulescu, G. P. (2012). Methods for Total Antioxidant Activity Determination : A Review. *Biochemistry & Analytical Biochemistry*, 01(01). <https://doi.org/10.4172/2161-1009.1000106>
- PlantGrape. (2024). *Chardonnay B*. PlantGrape.
- Pons, A. (2010). *Caractérisation chimique du vieillissement défectueux des vins blancs secs*. <https://heberge.lp2ib.in2p3.fr/heberge/EcoleJoliotCurie/coursannee/cours/coursPons.pdf>
- Pons, A., Lavigne-Cruege, V., Darriet, P., & Dubourdiou, D. (2008). The premature aromatic aging of white wines : Contribution of sotolon. *Biofutur*.

- Rapp, A., Versini, G., & Engel, L. (1995). Determination of 2-aminoacetophenone in fermented model wine solutions. *Vitis*, 34, 193-194.
- Rapp, A., Versini, G., & Ullemeyer, H. (1993). 2-aminoacetophenone : Causal component of « untypical aging flavour » (« naphthalene note », 'hybrid note') of wine. *VITIS - Journal of Grapevine Research*, 32(1), Article 1. <https://doi.org/10.5073/vitis.1993.32.61-62>
- Renouf, V., Louazil, P., Irtumendi, N., Moine, V., & Daulny, B. (2013, avril 23). Nouvelles alternatives pour le collage des moûts de raisins blancs. *La Revue des Œnologues*, 30-33.
- Ribéreau-Gayon, P. (1974). *Les composés phénoliques du raisin et du vin*. Institut National de la Recherche Agronomique.
- Ribéreau-Gayon, P., Dubourdieu, D., Donèche, B., & Lonvaud, A. (2020). *Traité d'oenologie—Tome 1* (7ème édition, Vol. 1). Dunod.
- Rihak, Z., Prusova, B., Kumsta, M., & Baron, M. (2021). Effect of Must Hyperoxygenation on Sensory Expression and Chemical Composition of the Resulting Wines. *Molecules*, 27(1), 235. <https://doi.org/10.3390/molecules27010235>
- Rizzi, G. P. (2006). Formation of strecker aldehydes from polyphenol-derived quinones and alpha-amino acids in a nonenzymic model system. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(5), 1893-1897. <https://doi.org/10.1021/jf052781z>
- Robards, K., Prenzler, P., Tucker, G., Swatsitang, P., & Glover, W. (1999). Phenolic compounds and their role in oxidative processes in fruits. *Food Chemistry*, 66(4), 401-436. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00093-X)
- Roland, A. (2010). *Influence des phénomènes d'oxydation lors de l'élaboration des moûts sur la qualité aromatique des vins de Melon B. et de Sauvignon Blanc en Val de Loire*.
- Romanet, R., Coelho, C., Liu, Y., Bahut, F., Ballester, J., Nikolantonaki, M., & Gougeon, R. D. (2019). The Antioxidant Potential of White Wines Relies on the Chemistry of Sulfur-Containing Compounds : An Optimized DPPH Assay. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 24(7), 1353. <https://doi.org/10.3390/molecules24071353>
- Romeyer, F. M., Macheix, J. J., Goiffon, J. J., Reminiac, C. C., & Sapis, J. C. (1983). Browning capacity of grapes. Changes and importance of hydroxycinnamic acid-tartaric acid esters during development and maturation of the fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 31(2), 346-349. <https://doi.org/10.1021/jf00116a040>
- Romieu. (2024). *Développement de la baie dans la future vendange* [Illustrations de cours].
- Sablayrolles, J. (1990). *Besoins en oxygène lors des fermentations œnologiques*.
- Saint Cricq de Gaulejac, N. F. d'Oenologie, Vivas, N., & Glories, Y. (1998). Maturite phenolique : Definition et controle. *Revue Francaise d'Oenologie (France)*.
- Salacha, M.-I., Kallithraka, S., & Tzourou, I. (2008). Browning of white wines : Correlation with antioxidant characteristics, total polyphenolic composition and flavanol content. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(6), 1073-1077. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01567.x>
- Santos-Buelga, C., Francia-Aricha, E. M., & Escribano-Bailón, M. T. (1995). Comparative flavan-3-ol composition of seeds from different grape varieties. *Food Chemistry*, 53(2), 197-201. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)90788-9](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)90788-9)
- Sarni-Manchado, P., & Cheynier, V. (2006). *Les polyphénols en agroalimentaire*.
- Sayavedra-Soto, L. A., & Montgomery, M. W. (1986). Inhibition of Polyphenoloxidase by Sulfite. *Journal of Food Science*, 51(6), 1531-1536. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1986.tb13852.x>
- Schneider, V. (1998). Must Hyperoxidation : A Review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49(1), 65-73. <https://doi.org/10.5344/ajev.1998.49.1.65>

- Schneider, V. (2016). Chemical and sensory discrimination of different kinds of white wine aging and oenological measures to improve white wine flavor stability : A review. In *Recent Advances in Wine Stabilization and Conservation* (p. 163-207). Nova Science Publisher.
- Shahood, R., Rienth, M., Torregrosa, L., & Romieu, C. (2015). *Evolution of grapevine (Vitis Vinifera L.) berry heterogeneity during ripening* (Vol. 2, p. 564-568).
- Silva Ferreira, A. C., Hogg, T., & Guedes de Pinho, P. (2003). Identification of key odorants related to the typical aroma of oxidation-spoiled white wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(5), 1377-1381. <https://doi.org/10.1021/jf025847o>
- Singleton. (1987). Oxygen with Phenols and Related Reactions in Musts, Wines, and Model Systems : Observations and Practical Implications. *American Journal of Enology and Viticulture*, 38(1), 69-77. <https://doi.org/10.5344/ajev.1987.38.1.69>
- Singleton, & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Singleton, Salgues, M., Zaya, J., & Trousdale, E. (1985). Caftaric Acid Disappearance and Conversion to Products of Enzymic Oxidation in Grape Must and Wine. *American Journal of Enology and Viticulture*, 36(1), 50-56. <https://doi.org/10.5344/ajev.1985.36.1.50>
- Sochor, J., Dobes, J., Krystofova, O., Rutkay-Nedecky, B., Babula, P., Pohanka, M., Jurikova, T., Zitka, O., Adam, V., Klejdus, B., & Kizek, R. (2013). Electrochemistry as a Tool for Studying Antioxidant Properties. *International Journal of Electrochemical Science*, 8(6), 8464-8489. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)12902-6](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)12902-6)
- Swiegers, J., Bartowsky, E., Henschke, P. A., & Pretorius, I. (2005). Yeast and bacterial modulation of wine aroma and flavour. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11, 139-173.
- Tsai Su, C., & Singleton, V. L. (1969). Identification of three flavan-3-ols from grapes. *Phytochemistry*, 8(8), 1553-1558. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)85929-4](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)85929-4)
- Ugliano, M. (2013). Oxygen Contribution to Wine Aroma Evolution during Bottle Aging. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(26), 6125-6136. <https://doi.org/10.1021/jf400810v>
- Ugliano, M. (2016). Rapid fingerprinting of white wine oxidizable fraction and classification of white wines using disposable screen printed sensors and derivative voltammetry. *Food Chemistry*, 212, 837-843. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.156>
- van Leeuwen, C., Darriet, P., Pons, A., & Dubernet, M. (2016). *Effet du changement climatique sur le comportement de la vigne et la qualité du vin*.
- Verdenal, T., Dienes-Nagy, Á., Spangenberg, J. E., Zufferey, V., Spring, J.-L., Viret, O., Marin-Carbonne, J., & Leeuwen, C. van. (2021). Understanding and managing nitrogen nutrition in grapevine : A review. *OENO One*, 55(1), Article 1. <https://doi.org/10.20870/oenone.2021.55.1.3866>
- Vidal, J. (2006). *Eurofins—Définition de la validation de méthode et outils associés*. Journée de Formation Scientifique en Spectrométrie Atomique, Paris.
- Vidal, & Moutounet. (2008). La maîtrise des apports d'oxygène au conditionnement. *Revue Française d'Oenologie*.
- Vinventions. (2024). *Guide d'utilisation du Polyscan*.
- Vivas, N. (1999). *Les oxydations et les réductions dans les moûts et les vins*. Editions Féret.
- Vivas, N., Vivas de Gaujelac, & Nonier. (2003). Estimation et quantification des composés phénoliques des vins. In *Polyphénols des vins* (Vol. 865-866, p. 282-303).
- Waterhouse, A., & Laurie, F. (2006). Oxidation of Wine Phenolics : A Critical Evaluation and Hypotheses. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57(3), 306-313. <https://doi.org/10.5344/ajev.2006.57.3.306>

- Wildenrad, H. L., & Singleton, V. L. (1974). The Production of Aldehydes as a Result of Oxidation of Polyphenolic Compounds and its Relation to Wine Aging. *American Journal of Enology and Viticulture*, 25(2), 119-126. <https://doi.org/10.5344/ajev.1974.25.2.119>
- Yaylayan, V. (2003). *Recent Advances in the Chemistry of Strecker Degradation and Amadori Rearrangement : Implications to Aroma and Color Formation*. J-Stage.
- Yuan, F., & Qian, M. C. (2016). Development of C13-norisoprenoids, carotenoids and other volatile compounds in *Vitis vinifera* L. Cv. Pinot noir grapes. *Food Chemistry*, 192, 633-641. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.050>
- Zerbib, M. (2018). *Etude de la glycosylation de flavanols dans le raisin et incidence dans les vins* [Phdthesis]. Université Montpellier.

ANNEXES

A. Annexe 1

Tableau 11 : Méthodes d'analyses de la capacité oxydative et antioxydante d'une matrice vin.

Méthode	Matériel	Principe	Avantages	Limites	Paramètres analysés	Paramètres évalués
Test de tenue à l'air		Analyse sensorielle : dégustation de l'échantillon avant et après exposition à l'air pendant plusieurs heures. Les évolutions de la couleur et du profil aromatique sont évaluées.	Facile à réaliser, peu coûteux	Subjectif	Couleur, arômes	Stabilité du vin
Spectrophotométrie IRTF	Spectrophotomètre avec interféromètre de Michelson ex: WineScan Foss	L'IRTF repose sur une mesure spectrale dans la zone 1000 à 10 000cm ⁻¹ avec un pas de l'ordre de 2 à 3cm ⁻¹ (moyen Infrarouge). Le spectre IRTF identifie les différentes liaisons chimiques des composés organiques, et non une molécule spécifique. L'interprétation quantitative et qualitative du spectre repose sur une approche purement mathématique et statistique, basé sur l'application de modèle obtenus avec des données, introduites au cours d'une phase d'apprentissage du système.	Pas de préparation de l'échantillon, rapide.	Nécessite une base de données importante afin de comparer les spectres, étalonnage.		
Ampérométrie	Sonde avec une cellule contenant : une cathode en métal noble (argent, or ou platine) et une anode en argent ou en plomb, reliées électriquement par un électrolyte. L'échantillon et l'électrolyte sont séparés par une membrane sélective perméable à l'oxygène.	Le principe de cette méthode électrochimique consiste à appliquer une tension constante aux électrodes, provoquant la réduction de l'oxygène qui diffuse à travers la membrane de la sonde. Cette réaction électrochimique produit un signal électrique directement proportionnel à la pression partielle de l'oxygène contenu dans l'échantillon. Méthode qui répond à la loi de Henry, un étalonnage adapté doit être réalisé (utilisation de l'air par exemple comme source de pression partielle connue de l'oxygène).	Limite de détection basse, étalonnage simple.	Coût.	O ₂ dissous	Sensibilité à l'O ₂
Polarographie		Même principe que l'ampérométrie, sauf que le potentiel appliqué aux électrodes est croissant et proportionnel avec le temps.				
Coulométrie	Cellule galvanique contenant : une cathode en métal noble (argent, or ou platine) et une	L'oxygène contenu dans l'échantillon diffuse dans la cellule au travers de la membrane. Le système électrodes/électrolyte génère son propre potentiel, ce qui va entraîner la réduction de l'oxygène à la cathode. Cette réaction génère un signal proportionnel à la	Haute précision et exactitude, sensible à de très	Maintenance : remplacement des membranes à prévoir et		

	anode en zinc, plongées dans un électrolyte. Sonde avec une membrane perméable sélective à l'O ₂ pour isoler la cellule du composé à mesurer.	concentration d'oxygène. Plus la teneur en oxygène diminue, plus le courant fourni à la cathode augmente. La quantité d'électricité requise pour réduire l'oxygène au niveau de la cathode est équivalente à la teneur en oxygène dissous.	faible taux d'O ₂ .	dégradation des solutions électrolytiques, complexité, sensible aux impuretés de l'échantillon.	
Spectroscopie d'absorption	Spectromètre d'absorption	Emission d'une lumière une longueur d'onde spécifique dans l'IR correspondant à la bande d'absorption caractéristique de l'oxygène. Lorsque la lumière traverse l'échantillon, une partie est absorbée par les molécules d'oxygène présentes. Le détecteur, placé après l'échantillon, permet de mesurer l'intensité de la lumière transmise. La réduction de l'intensité lumineuse par rapport à la lumière émise permet de déterminer la concentration en oxygène en utilisant la loi de Beer-Lambert.	Haute sensibilité, sélectivité minimisant les interactions avec d'autres gaz, rapidité, non-destructive.	Coût élevé, maintenance, complexité d'étalonnage.	
Luminescence	Sonde avec une source de lumière d'excitation, une source de lumière de référence et un photodétecteur.	La détection de l'oxygène repose sur la mesure de la fluorescence d'un luminophore sensible à l'oxygène. Des marqueurs luminescents spécifiques, luminophores, émettent de la lumière lorsqu'ils sont excités par une source de lumière appropriée (ex: bleue). L'impulsion de lumière d'excitation (ex: lumière bleue) déclenche la luminescence des marqueurs. Les électrons du luminophore augmentent fortement en niveau d'énergie, qui par la suite s'abaisse à nouveau émettant sous forme de lumière (ex: rouge) l'énergie perdue. L'oxygène est un quencher car en entrant en contact avec le luminophore il absorbe l'énergie des électrons, réduisant ainsi l'intensité et la durée d'émission de la lumière émise (rouge). Ce phénomène d'extinction est mesuré par un photodétecteur puis converti en concentration d'oxygène dissous. Plus l'extinction est rapide, plus la concentration d'oxygène dissous est élevée. La mesure de l'oxygène par	Haute sensibilité, réponse rapide, stabilité du signal, non-destructif pour l'échantillon, dispositif portatif existant	Dépend de la température, dégradation des marqueurs, interférences lumineuses, étalonnage complexe	O ₂ dissous, O ₂ gazeux

		luminescence est donc une mesure physique se basant sur une mesure du temps.				
Spectroscopie par Résonance Paramagnétique Electronique (RPE)	Spectromètre avec cellule à haute température	Méthode qui repose sur la mesure de l'absorption de l'énergie des micro-ondes par les électrons non-appariés lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique (effet Zeeman). La mise en évidence d'électrons à proximité de noyaux atomiques permet de déduire et caractériser la structure des molécules.	Seule technique mettant directement en évidence les radicaux libres	Très sensible, coût.	Ions métalliques, radicaux libres (ERO)	
Colorimétrie	Spectrophotomètre	<p>Suivi d'évolution ou changement de couleurs dus aux interactions de molécules spécifiques avec les antioxydants de l'échantillon analysé. Différentes méthodes peuvent être utilisées (Pisoschi & Negulescu, 2012).</p> <p>DPPH: Le radical chimique DPPH est réduit par les antioxydants de l'échantillon par transfert d'électron ou d'hydrogène. Le DPPH initialement violet se transforme en DPPH-H jaune (Romanet et al., 2019).</p> <p>ABTS: Le piégeage du radical ABTS, vert/bleu, par les antioxydants de l'échantillon entraîne une diminution de l'intensité colorante.</p> <p>FRAP: Les antioxydants de l'échantillon induisent la réduction du Fe³⁺ du TPTZ en sa forme Fe²⁺ de couleur bleue (Benzie & Devaki, 2018).</p> <p>CUPRAC: Le réactif cuivre/néocuproïne est capable d'oxyder les antioxydants de l'échantillon, générant un produit coloré.</p> <p>ORAC: Les radicaux produits par la décomposition de l'AAPH réagissent avec la fluorescéine, entraînant une diminution de sa fluorescence. En présence d'antioxydants, l'oxydation de la fluorescéine est limitée par piégeage des radicaux. La comparaison de la diminution de l'intensité fluorescente de l'échantillon avec un témoin sans antioxydant permet d'estimer la capacité antioxydante de l'échantillon.</p> <p>Folin Ciocalteu: La méthode repose sur le transfert d'électrons en milieu alcalin de composés phénoliques pour former un chromophore bleu constitué par un complexe phosphotungstique / phosphomolybdenum où</p>		Risques d'interférences	Antioxydants de l'échantillon, composés phénoliques	Capacité antioxydante du vin : capacité à piéger les radicaux libres, neutralisation des ERO, inactivation des métaux catalyseurs

		l'absorption maximale dépend de la concentration des composés phénoliques.				
Chromatographie : -GC -HPLC -MS	GC : Chromatographe avec phase stationnaire et phase mobile adapté, détecteur (FID souvent). HPLC : Colonne avec phase stationnaire et détecteur (diode) adaptés. MS: Spectromètre de masse	Séparation et détection des molécules. Méthodes pouvant être couplées.	Haute résolution.		Flavanols, catéchines, acides hydroxy cinnamiques, composés d'arômes.	Capacité antioxydante du vin. Caractérisation du potentiel phénolique. Analyse des défauts d'arômes.
Electrochimie / Voltamétrie	Ex : Nomasens Polyscan	Voltamétrie linéaire à balayage : Enregistrer l'intensité du courant émis lors de réaction d'oxydation, induite par l'application de potentiels de plus en plus élevés à l'interface d'une électrode au contact du vin.	Adapté à tous les cépages, rapide, en temps-réel	Nécessite une base de données importante.	Composés phénoliques et composés facilement oxydables	Estimé la stabilité oxydative.

B. Annexe 2

Cahier de protocole VOLTA - Cave



Suivi de pressoirs

Matériel pour les mesures : Objectifs :

PolyScan chargé
Boîte d'électrodes
Récipient de prélèvement
Compte-goutte
Fiche Informations sur le lot
Fiche codage
Ph-mètre (si possibilité)

- Évaluer les pratiques de pressurage en Bourgogne, sur différents types de pressoir, en termes d'extraction de polyphénols
- Évaluer ce que la fraction de jus concentrée en polyphénol représente par rapport au volume de jus total.

Protocole de mesure :

Préparation du PolyScan avant prélèvement de l'échantillon :

Renseigner : pressurage ; couleur ; cépage

Rentrer le nom de la série (cf. Fiche codage) puis « créer une série »

Rentrer le nom d'échantillon (cf. Fiche codage – *goutte, p1, p2, p3...*) (ne pas cliquer sur « démarrer »)

Connecter l'électrode (ne pas utiliser 2 fois la même électrode et ne pas mettre ses doigts sur la zone noire de dépôt de la goutte)

PolyScan à plat (sinon la goutte rentre dans l'appareil !)

Prélèvement de l'échantillon :

Pour cette étape, les mesures seront faites à chaque cycle de pressurage. Une mesure sur jus de goutte, une au lancement du pressoir, puis une à chaque montée en pression. La mesure se prend à la fin de la montée en pression pour un palier donné = quand le débit des jus est le plus fort.

Prélever du moût à l'aide du récipient de prélèvement :

Directement à la tombée des jus issus de la cage si possible

Sinon, au collecteur de jus ou au dégustateur si le pressoir est équipé

Sinon, dans la maie ou sur un dégustateur sur le circuit de pompage des jus.

Méthode de prélèvement à renseigner dans la fiche « Informations sur le lot »

Ne pas prélever si l'on vient de sulfiter

Dès que l'échantillon est prélevé, déposer une goutte à l'aide du compte-goutte sur l'électrode et lancer la mesure PolyScan : appuyer sur « Démarrer » (cette étape doit être très rapide car le moût s'oxyde très vite !!)

Faire en complément du PolyScan une mesure de pH dans le bécher si possible

Une fois la mesure PolyScan terminée, jeter l'électrode et la remplacer par une nouvelle pour la mesure suivante

Si possible, relever le volume dans la cuve de collecte lors de chaque mesure PolyScan (volume extrait). Ce volume peut être mesuré à l'aide d'une jauge.

Pour passer à l'échantillon suivant, appuyer sur « nouvel échantillon » en bas de l'écran.

Renseigner la fiche « Informations sur le lot » (recto et verso)



Cuve de débouillage

Matériel pour les mesures : Objectif :

PolyScan chargé
Boîte d'électrodes
Bécher 250 mL
Compte-goutte
Fiche Informations sur le lot
Fiche codage

- Évaluer la concentration en polyphénols des jus avant débouillage

Protocole de mesure :

Préparation du PolyScan avant prélèvement de l'échantillon :

Renseigner : cuve de débouillage ; couleur ; cépage

Rentrer le nom de la série (cf. Fiche codage) puis « créer une série »

Rentrer le nom d'échantillon (cf. Fiche codage - *CD*) (ne pas cliquer sur « démarrer »)

Connecter l'électrode (ne pas utiliser 2 fois la même électrode et ne pas mettre ses doigts sur la zone de dépôt de la goutte)

PolyScan à plat (sinon la goutte rentre dans l'appareil !)

Prélèvement de l'échantillon :

Réaliser la mesure à la fin du remplissage de la cuve avant ajout de colle/avant débouillage.

Prélever du jus de la cuve dans le bécher de 250 mL :

Si prélèvement au dégustateur : faire couler du jus pour « rincer » le robinet

Si prélèvement au plongeur : ne pas prélever les jus de surface, prélever dans la masse

Si prélèvement à la vanne : éliminer les 1^{ers} jus

Privilégier le prélèvement au robinet. Si ce n'est pas le cas, le préciser sur la fiche « Informations sur le lot »

Immédiatement, à l'aide du compte-goutte, prélever le jus du bécher et déposer une goutte sur l'électrode

Lancer la mesure : appuyer sur « Démarrer »

Des informations complémentaires (colle, enzyme...) peuvent être ajoutées en tant que commentaire.

Appuyer ensuite sur terminer, jeter l'électrode et éteindre le PolyScan

Renseigner la fiche « Informations sur le lot » :

Penser à noter sur la fiche « Informations sur le lot » les analyses sur vin après débouillage : pH, AT, TAP, NTU, azote assimilable, SO₂L, SO₂T, proportion de bourbes en fonction du volume de cuve.



Orientation fin FA (A faire en fin de FA, fin de FML et tous les 3 à 4 mois pendant l'élevage)

Matériel pour les mesures :

PolyScan chargé
Boîte d'électrodes
Flacon plastique de 125 mL
Pipette verre 50 mL + poire
Bécher 250 mL
Compte-goutte
Étiquettes pour échantillons
Fiches Informations sur le lot ou 1 ^{er} point suivi d'élevage ou suivi élevage
Fiche codage

Objectif :

- Evaluer la sensibilité du vin à l'oxydation en tant que marqueur de son potentiel de longévité.

Protocole de mesure :

Préparation du PolyScan avant prélèvement de l'échantillon :

Renseigner : orientation fin FA ; couleur ; cépage

Rentrer le nom de la série (cf. Fiche codage) puis « créer une série »

Rentrer le nom d'échantillon (cf. Fiche codage – FFA, FFML, ELV...) (ne pas cliquer sur « démarrer »)

Connecter l'électrode (ne pas utiliser 2 fois la même électrode et ne pas mettre ses doigts sur la zone de dépôt de la goutte)

PolyScan à plat (sinon la goutte rentre dans l'appareil !)

Prélèvement de l'échantillon

Réaliser la mesure fin FA quand vin +/- sec.

Pour toutes les mesures orientation fin FA (stade fin FA, fin FML, élevage), faire les mesures avant un soutirage/sulfitage/batonnage. Ou bien si après un pompage/sulfitage/batonnage, attendre une semaine pour faire la mesure PolyScan.

Prélever du vin dans le bécher de 250 mL

Au dégustateur : faire couler du jus pour « rincer » le robinet

Au plongeur : ne pas prélever les jus de surface, prélever dans la masse

Sur fût : prélever dans la masse et sur un unique fût du lot

Privilégier le prélèvement au robinet. Si ce n'est pas le cas, le préciser sur la fiche « Informations sur le lot »

A l'aide de la pipette, prélever 50 mL de vin

Déposer tout de suite la première goutte sur l'électrode et lancer la mesure

Descendre les 50 mL dans le flacon plastique de 125 mL en prenant garde à mettre l'embout de la pipette en bas de flacon (sous le niveau de liquide)

Refermer le flacon, sans agiter.

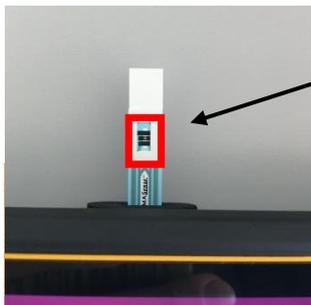
L'échantillon est étiqueté et conservé à température de la cuverie pendant 2h

Après 2h d'attente, faire le second point de mesure. Pour cela, prélever à l'aide du compte-goutte, une goutte de cet échantillon et la déposer sur une nouvelle électrode avant de lancer la mesure.

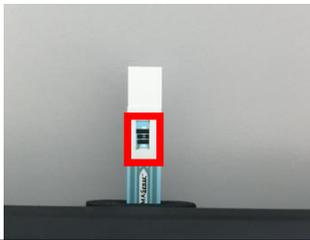
Un résultat s'affiche et vous indique si le vin est sensible ou non

Appuyer ensuite sur terminer, jeter l'électrode et éteindre le PolyScan

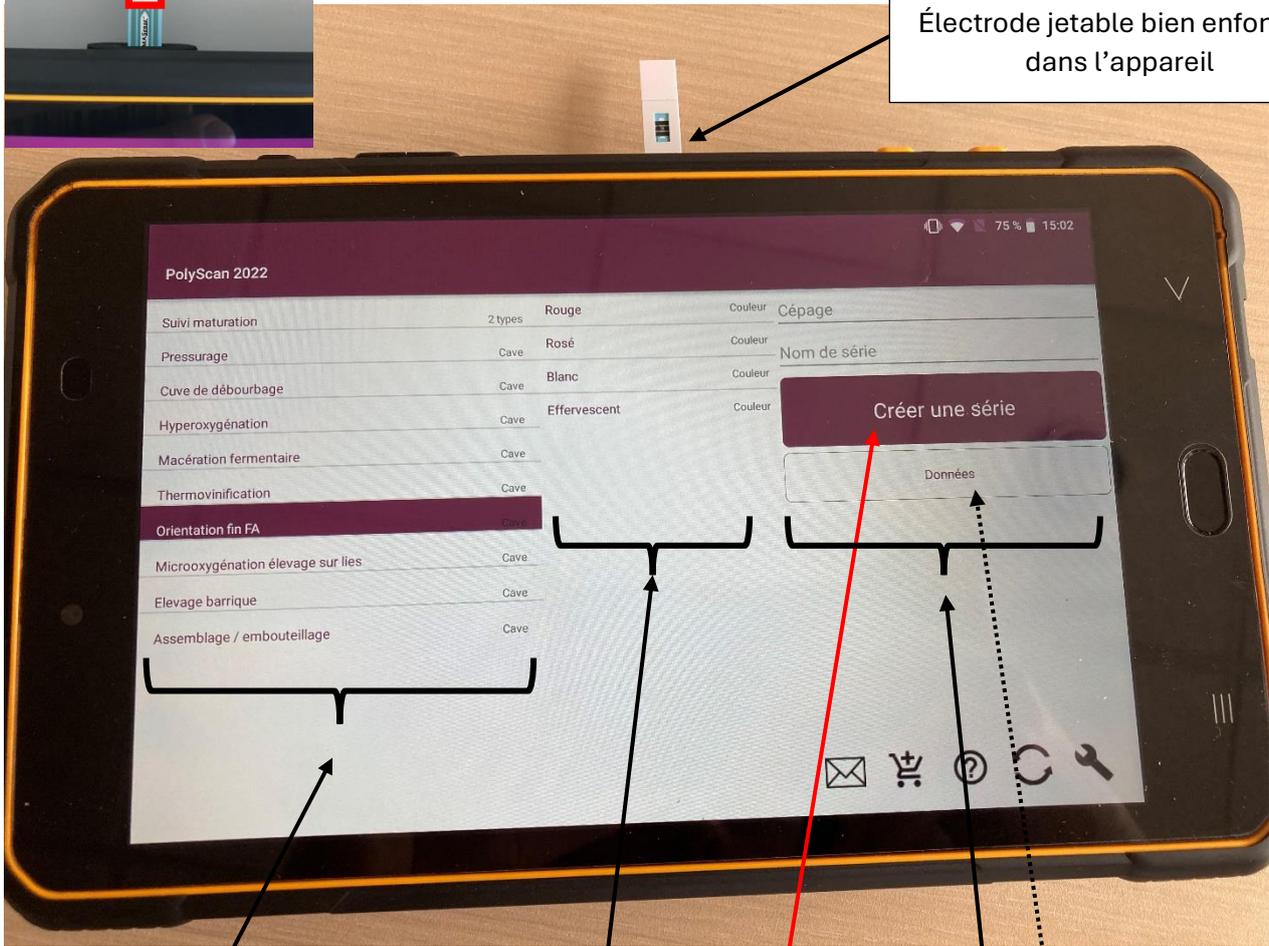
Renseigner la fiche « Informations sur le lot » si stade fin FA ou bien fiche 1^{er} point suivi élevage ou fiche suivi élevage si mesures en cours d'élevage



Zone de dépôt de la goutte qui doit bien recouvrir l'ensemble du carré. Ne pas mettre ses doigts



Électrode jetable bien enfoncée dans l'appareil



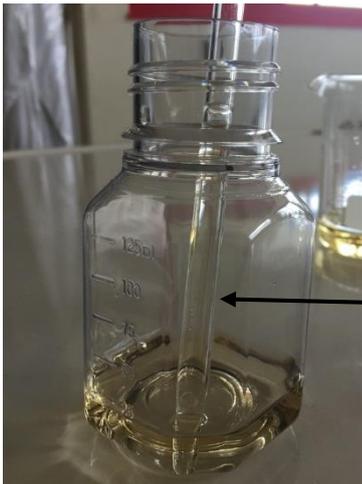
Sélection du type de mesure souhaité : ici « Orientation fin FA » sélectionné

Sélection de la couleur :

Sélection cépage : Chardonnay
Codage des mesures

Une fois les informations complétées : créer la série

Données : pour consulter les mesures réalisées et les résultats obtenus



Pour Orientation fin FA, dépôt des 50 mL de vin dans le flacon plastique de 125 mL :
L'embout de la pipette en bas du flacon, sous le niveau du liquide pour ne pas faire de bulles d'air.

C. Annexe 3

Cahier de protocole VOLTA 2024



Suivi maturité (de mi-véraison jusqu'à la récolte)

Matériels :

PolyScan chargé
Boîte d'électrodes neuves
Sac de congélation refermable
Pipette pasteur non stérile
Fiche de suivi du contrôle maturité
Flacon (100ml) pour analyse labo

Objectif :

- Caractériser la maturité

Protocole de mesure :

1. Prélèvement de l'échantillon à la parcelle

En cas de plusieurs parcelles suivies, réaliser toujours le même ordre de prélèvement, aux mêmes heures et par le même opérateur.

Sélectionner et baliser 10 rangs dans la parcelle qui seront utilisés pour tous les prélèvements de l'essai. Exclure les pointes et les rangs de garde. Exclure les 3 pieds en bout de rang. Lors du prélèvement, monter et descendre toujours les mêmes rangs.

Dans un sachet de congélation refermable, recueillir au hasard 200 baies (pas de grappe entière, ni de rafle). Les baies doivent être prélevées de chaque côté de l'interligne, en alternant la position haute/basse, les faces de la grappe (ombre vs. soleil) et la profondeur des baies dans la grappe (surface vs. Intérieure).

Le transport doit se faire dans une glacière maintenue à 15°C. Renseigner la fiche « suivi maturité ».

Tutoriel vidéo de cette étape disponible [ici](#).

2. Effectuer les mesures

Les mesures doivent être réalisées, au plus tard, dans les 5h qui suivent le prélèvement.

a. Poids du prélèvement

A l'aide d'une balance, peser le prélèvement : poids global des 200 baies + sachet de congélation. Renseigner le poids sur la fiche « suivi maturité », en enlevant le poids du sachet.

b. Préparation du PolyScan

Pour chaque parcelle suivie, une série d'analyse correspondante doit être créée (création de la série lors de la 1ere mesure). Ensuite les autres analyses du suivi maturité devront être réalisées sous la série de la parcelle concernée. Ainsi, une série = un suivi maturité, avec différents points de mesures, pour une parcelle donnée.

- Cas pour la première mesure = création de la série de suivi maturité :

Créer la série de suivi : *Suivi maturation* > *séquence aromatique* > *blanc* >

Renseigner le *cépage* « Chardonnay »

Renseigner *Nom série* avec le « nom de la parcelle » (au format N°site_NomParcelle_millésime)

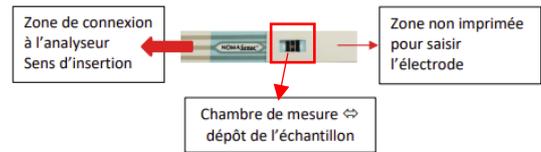
Cliquer sur *Créer une série*

Renseigner *Nom d'échantillon* = mettre la date du jour au format JJMMAA (ne pas cliquer sur « démarrer »)

Connecter l'électrode (ne pas utiliser 2 fois la même électrode et ne pas mettre ses doigts sur la zone noire de dépôt de la goutte)

Tutoriel vidéo de cette étape disponible [ici](#).

Tutoriel vidéo de réalisation de la 1^{ère} mesure à partir d'une série déjà créée disponible [ici](#).



- Cas pour les mesures après le 1^{er} prélèvement :

Menu principal > *Données* >

Rechercher votre série correspondant à la parcelle à analyser

Cliquer sur *Nouvel échantillon* (en bas à gauche)

Renseigner *Nom d'échantillon* = mettre la date du jour au format JJMMAA (ne pas cliquer sur « démarrer »)

Connecter l'électrode (ne pas utiliser 2 fois la même électrode et ne pas mettre ses doigts sur la zone noire de dépôt de la goutte).

Tutoriel vidéo de cette étape disponible [ici](#).

c. Mesure du MaturOx

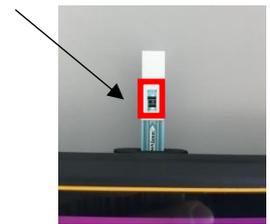
Au travers du sachet de congélation, fouler les baies à la main. Vérifier que toutes les baies soient écrasées.

A l'aide d'une pipette pasteur, prélever du jus et déposer une goutte sur l'électrode du polyscan.

Appuyer sur *Démarrer* (cette étape doit être très rapide car le moût s'oxyde très vite !!)

Une fois la mesure terminée, retirer et jeter l'électrode.

Renseigner l'indice MaturOx sur la « fiche de suivi contrôle maturité ».



/!\ Ne pas jeter le raisin foulé ! Continuer de fouler et presser le contenu du sachet afin de récolter minimum 100mL de jus. Envoyer ce prélèvement au laboratoire pour analyses, voir III.3. Tutoriel vidéo de cette étape disponible [ici](#).

3. Les analyses au laboratoire

Les analyses suivantes sont à réaliser/demander au laboratoire :

- Sucre
- AT
- pH
- Acide malique
- Azote assimilable

Renseigner les résultats sur la « fiche de suivi contrôle maturité ».

N'oubliez pas de nous communiquer l'ensemble de vos résultats d'analyses.

4. Renseigner la concentration en sucre

L'interprétation de l'indice MaturOx nécessite de connaître le taux de sucre. Munissez-vous des résultats d'analyses du laboratoire pour cette étape.

Sur le polyscan :

Menu principal > *Données* >

Rechercher la série correspondante et cliquer dessus

Cliquer sur la date d'analyse correspondant à la mesure effectuée

Renseigner la *Concentration en sucre en g/L* (en bas à droite) puis cliquer sur *OK*.

Tutoriel vidéo de cette étape disponible [ici](#)

"Données supprimées : non conformes RGPD"

Numéro de site :



FICHE DE SUIVI CONTROLE MATURITE

PARCELLE SUIVIE :

INFORMATIONS SUR LA PARCELLE

Densité :	Clone :	Maladie/pression parasitaire :	Date floraison :	Potentiel de garde estimé :
% de manquant :	Porte-greffe :	Evènements marquants :	Date véraison :	Certifications/labels :
			Date récolte (Réelle) :	Date de récolte théorique/optimale :

CONTROLE MATURITE

Date du prélèvement	Qualité sanitaire	Poids de 200 baies	Sucre g/L	AT	pH	Ac. malique	Nass	MaturOx	Date dernières pluies	Date dernier traitement

COMMENTAIRES

