

UNIVERSITÉ DE NANTES  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

---

ÉCOLE DOCTORALE VÉGÉTAL ENVIRONNEMENT NUTRITION AGRO-ALIMENTAIRE MER (VENAM)

Année 2014

N° attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Compréhension des facteurs physiques et physiologiques  
impliqués dans les changements de propriétés mécaniques de la  
baie de raisin au cours de la maturation : impact de l'hétérogénéité  
de la matière première.

---

THÈSE DE DOCTORAT  
Discipline : Sciences Agro-alimentaires  
Spécialité : Viticulture Œnologie

*Présentée  
et soutenue publiquement par*

**Stéphanie DOUMOYA**

*Le 16 Mai 2014, devant le jury ci-dessous*

Rapporteurs Luigi BAVARESCO, Professeur, Università Cattolica del Sacro Cuore di Piacenza  
Laurent TORREGROSA, Professeur, Montpellier SupAgro

Examineurs Nadia BERTIN, Directeur de recherche, INRA d'Avignon  
Serge DELROT, Professeur, Université Bordeaux 2 Victor Segalen  
Christophe VERONESI, Maître de conférences, Université de Nantes

Directeur de thèse :  
Marc LAHAYE, Directeur de recherche, INRA Nantes

Encadrant de thèse :  
René SIRET, Enseignant-chercheur, Groupe ESA Angers



# **Remerciements**

Ce travail de thèse n'aurait pas pu être possible sans le soutien de mes deux encadrants **René Siret** et **Marc Lahaye** à qui je voue un profond respect. Je suis consciente de la chance que j'ai eu d'avoir pu travailler à vos côtés. Votre investissement, votre pédagogie et votre patience m'ont permis de mener dans les meilleures conditions ce travail de thèse. Je vous remercie infiniment pour la confiance que vous m'avez accordée.

Je tenais également à remercier tous les membres de mon comité de thèse : **Mesdames Frédérique Jourjon, Emira Méhinagic, Chantal Maury, Laurence Guérin**, et Messieurs **Serge Delrot, Thierry Doco, Philippe Mongondry, Gérard Barbeau**, qui par leurs avis et suggestions ont permis d'améliorer l'orientation et la qualité de mes recherches. Merci également à l'ensemble des membres du laboratoire EGFV de l'Institut des Sciences de la Vigne et du Vin de Bordeaux pour m'avoir accueilli et plus spécifiquement Madame **Ghislaine Hilbert** pour son encadrement et sa disponibilité.

Je fais également part de ma reconnaissance à l'ensemble des membres actuels et passés de l'UPSP GRAPPE, ce laboratoire dynamique et chaleureux qui m'a accueilli comme une famille. Je n'oublierai pas les superbes rencontres que j'y ai faits. Plus précisément je tiens à remercier **Sophie Clavier, Dominique Lemeurley, Isabel Saillard, Véronique Forgerit** et **Corine Patron** qui ont pu m'assister dans les différentes analyses. Merci à **Ronan Symoneaux** pour sa bonne humeur et son aide précieuse en statistiques. Merci à **Isabelle Maître** pour sa gentillesse et **Christel Renaud** pour sa douceur, je vous souhaite une très bonne fin de thèse. Merci à **Laurence Beauchet** pour sa disponibilité, **Emmanuel Madietta** et **Séverine Trinquier** pour leur joie de vivre et toujours un petit mot gentil.

Bien plus que des collègues j'ai la chance d'avoir rencontré de véritables ami(e)s. Merci à **Cécile Bavay** et **Mathilde Charles**, je n'oublierai pas nos bons moments passés à l'ESA ou en dehors, je vous souhaite une très belle carrière. Merci à **Céline** et **Christopher Brasse** pour toutes ces soirées, apéros, barbecue, matchs de foot et j'en passe où nous nous sommes toujours amusés, merci de nous avoir permis de partager ces moments conviviaux avec vous.

Merci à **Grabriela Sepulveda-Paz** ma Chilienne préférée à qui je souhaite le meilleur pour la suite de ses études. Merci à **Mathilde Descamps** pour sa douceur et sa gentillesse et qui cuisine comme une chef le poulet Yassa ! Merci à mon frère et ma sœur de cœur **Mohamed Lamine Askoura et Saoussen Boudraa**, je n'oublierai pas votre amitié précieuse et vous souhaite une très belle fin de thèse. Merci également aux nouveaux doctorants du laboratoire **Amale, Daniel, Sandra et Matthieu** à qui je souhaite beaucoup de réussite dans leurs projets respectifs. Sans oublier tous ceux et celles qui sont venus en contrat ou en stage au laboratoire et avec qui je partage que de très bons souvenirs : **Eben, Génica, Catherine, Gaëlle, Abel, Paola, Salvador, Mara, Anna Laura, Patricia...**

Merci infiniment à mes amis d'Angers : **Joaquim** mon coach de basket toujours prêt à me motiver quand il le faut. Aux membres de l'association AIFA : **Amina, Pauline, Marie, Marie-Thérèse, Catherine** pour leur investissement et leur soutien. Je remercie également mes amies de Bordeaux, **Fela, Nadia, Diara et Marie-José** d'avoir toujours été là pour moi dans les bons comme dans les mauvais moments, je vous adore.

C'est avec beaucoup d'émotion que je tiens à remercier tous les membres de ma famille que j'aime profondément. Merci à ma mère **Colette** à qui je voue un profond respect, merci d'avoir fait de moi ce que je suis. Merci à **Bertrand** qui nous a élevé ma sœur et moi comme un père. Merci à ma working-girl de sœur, **Nelly**, qui est une battante et un modèle pour la famille, je te souhaite beaucoup de bonheur dans tous tes projets. Merci à mon petit frère chéri, **Eddy**, qu'une grande carrière artistique attend. Merci à mon père **Alain, à Sylvie, Alexandra, Marie-Christelle, Pierre-Alain, Michael**, à mes oncles et tantes pour leur soutien.

Enfin, merci du fond du cœur à celui qui partage ma vie, ma moitié, mon meilleur ami que j'aime d'un amour intense depuis tant d'années et qui est mon premier supporter, **Guillaume**. Merci pour tes encouragements et ton soutien à toute épreuve, ta gentillesse et ton humour.

*Encore un grand merci à tous...*



# Valorisation des travaux de recherche

Ce travail de thèse a été financé par le Conseil Général du Maine-et-Loire. Il a été réalisé au sein de l'unité de Recherche en Agroalimentaire sur les Produits et Procédés GRAPPE du Groupe ESA d'Angers, sous la direction de Monsieur Marc Lahaye, chercheur à l'unité BIA de l'INRA de Nantes, et le co-encadrement de Monsieur René Siret enseignant-chercheur à l'ESA.

Les résultats de thèse ont fait l'objet des valorisations suivantes :

## **Publication dans des revues scientifiques et techniques internationales**

- **Doumouya, S.**, M. Lahaye, C. Maury, R. Siret. 2014. Physical and physiological heterogeneity within grape bunch: Impact on mechanical properties during maturation. *American Journal of Enology and Viticulture* 65(2): In press (Annexe 5)
- **Doumouya, S.**, R. Siret, R. Symoneaux, M. Lahaye. 2012. Etude et comparaison de l'évolution des propriétés mécaniques des raisins issus des cépages Cabernet Franc et Chenin (*Vitis vinifera* L.) au cours de la maturation. *Revue suisse, Viticulture, Arboriculture, Horticulture* 44(5) : 310-317 (Annexe 5)

## **Communications orales dans des congrès nationaux et internationaux**

- **Doumouya, S. 2013** - Compréhension des facteurs physiologiques et structuraux impliqués dans les changements de propriétés mécaniques de la baie au cours de son développement. **Journée Technique, Expérience et Recherche Vigne et Vin, 19 novembre 2013. Angers, France.**
- **Doumouya, S.**, M. Lahaye, C. Maury, R. Siret. Physical and physiological heterogeneity within grape bunch: Impact on mechanical properties during maturation. **Congrès International de l'OIV, 18-21 Juin 2012, Izmir, Turquie.**

- **Doumouya, S.**, R. Siret, R. Symoneaux, M. Lahaye. Etude et comparaison de l'évolution des propriétés mécaniques des raisins issus des cépages Cabernet Franc et Chenin (*Vitis vinifera* L.) au cours de la maturation. **IX<sup>ème</sup> Symposium International d'Œnologie de Bordeaux, 15-17 juin 2011, Bordeaux, France.**

#### Posters

- **Doumouya, S.**, M. Lahaye, C. Maury, R. Siret. 2014. Physical and physiological heterogeneity within grape bunch: Impact on mechanical properties during maturation. **In Vino Analytica, 2-5 Juillet 2013, Reims, France.**  
*(Récompensé par 2<sup>ème</sup> prix du meilleur poster) (Annexe 5)*
- **Doumouya, S. 2012**, R. Siret - Etude et comparaison de l'évolution des propriétés mécaniques des raisins issus des cépages Cabernet Franc et Chenin (*Vitis vinifera* L.) au cours de la maturation. **Macrowine 2012 -Macrovision of viticulture wine-making and markets, 18-21 juin 2012. Bordeaux, France.**
- **Doumouya, S.**, R. Siret, R. Symoneaux, M. Lahaye. Etude et comparaison de l'évolution des propriétés mécaniques des raisins issus des cépages Cabernet Franc et Chenin (*Vitis vinifera* L.) au cours de la maturation. **IX<sup>ème</sup> Symposium International d'Œnologie de Bordeaux, 15-17 juin 2011, Bordeaux, France**
- **Doumouya, S.**, R. Siret, R. Symoneaux, M. Lahaye. Etude et comparaison de l'évolution des propriétés mécaniques des raisins issus des cépages Cabernet Franc et Chenin (*Vitis vinifera* L.) au cours de la maturation. **Congrès International de l'OIV, juin 2011, Porto, Portugal.**



# Table des matières



# Sommaire

<b>Introduction générale .....</b>	<b>2</b>
<b>Etude bibliographique.....</b>	<b>8</b>
<b>I. Approche macroscopique de la grappe de raisin .....</b>	<b>8</b>
I.1. Morphologie de la baie de raisin .....	8
I.1.1. La pellicule.....	9
I.1.2. La pulpe (mésocarpe).....	9
I.1.3. Les pépins.....	10
I.2. Développement de la baie de raisin .....	10
I.2.1. Phase 1 : Phase de croissance herbacée (ou stade vert).....	11
I.2.2. Phase 2 : Phase de ralentissement de croissance (« plateau herbacé »).....	12
I.2.3. Phase 3 : Seconde phase de croissance : la maturation .....	12
<b>II. La maturation : Une combinaison de plusieurs types de maturité .....</b>	<b>14</b>
II.1. Introduction .....	14
II.2. Les composés de la maturité technologique.....	16
II.2.1. Les sucres réducteurs .....	16
II.2.2. Mesure du taux de sucre .....	17
II.2.3. Les acides organiques .....	18
II.2.4. Mesures de l'acidité :.....	19
II.3. Les composés de la maturité phénolique.....	20
II.3.1. Les composés phénoliques .....	20
II.3.2. Méthodes d'évaluation de la maturité phénolique .....	22
<b>III. Un indicateur émergent : « La maturité texturale » .....</b>	<b>24</b>
III.1. Définition de la texture des fruits .....	24
III.2. Mesure instrumentale de la texture .....	25
III.2.1. Les méthodes de compression destructive et non destructive .....	28
III.2.2. La méthode de pénétrométrie .....	30
III.2.3. Les méthodes de traction.....	30
III.3. Etude des propriétés mécaniques des raisins au cours de la maturation .....	31
<b>IV. Facteurs influençant le ramollissement de la baie de raisin.....</b>	<b>33</b>
IV.1. Rôle de la paroi cellulaire .....	34

IV.1.1. Structure générale des parois cellulaires.....	34
IV.1.2. Structures des parois cellulaires de la baie de raisin .....	35
IV.1.3. Evolution de la paroi cellulaire au cours de la maturation de la baie .....	36
IV.2. Rôle de l'eau.....	38
IV.2.1. Xylème et phloème .....	38
IV.2.2. Pression osmotique et turgescence .....	39
<b>V. Facteurs d'hétérogénéité de la vendange et échantillonnage .....</b>	<b>41</b>
V.1. Les facteurs d'hétérogénéité de la vendange .....	41
V.1.1. L'hétérogénéité à l'échelle de la parcelle.....	43
V.1.2. Hétérogénéité à l'échelle de la grappe. ....	45
V.2. Les protocoles d'échantillonnage.....	47
V.2.1. Protocole ITV .....	47
V.2.2. Protocole Carbonneau.....	48
V.3. Conclusion .....	48
<b>Problématique et démarche expérimentale .....</b>	<b>52</b>
<b>Matériels et méthodes.....</b>	<b>58</b>
<b>I. Matériel végétal .....</b>	<b>58</b>
I.1. Les cépages .....	58
I.1. Les parcelles .....	58
<b>II. Les millésimes .....</b>	<b>61</b>
<b>III. Dates de prélèvements .....</b>	<b>62</b>
<b>IV. Echantillonnage à la parcelle .....</b>	<b>64</b>
IV.1. Méthode d'échantillonnage globale .....	64
IV.2. Prélèvement grappes entières .....	65
<b>V. Echantillonnage au laboratoire .....</b>	<b>69</b>
V.1. Baies issues de l'échantillonnage global .....	69
V.2. Baies issues du prélèvement en grappe entière .....	69
<b>VI. Mesure instrumentale de la texture des raisins : .....</b>	<b>70</b>
VI.1. La double compression 20% .....	70
VI.2. La compression destructive 70%.....	72
VI.3. La pénétrométrie .....	72

VI.4. La traction sur pédicelle .....	73
VI.5. La traction sur pellicule .....	75
<b>VII. Caractéristiques physiques et physiologiques des raisins au cours de la maturation .</b>	<b>76</b>
<b>VIII. Analyses statistiques.....</b>	<b>78</b>
<b>Résultats et discussion .....</b>	<b>82</b>
<b>Chapitre 1: Evolution des propriétés mécaniques des raisins de Cabernet franc et de Chenin (<i>Vitis vinifera</i> L.) au cours de la maturation.....</b>	<b>82</b>
<b>I. Comparaison de la variabilité des paramètres mécaniques mesurés entre Chenin et Cabernet Franc .....</b>	<b>83</b>
<b>II. Comparaison des propriétés mécaniques sur baie entière .....</b>	<b>84</b>
II.1. La double compression 20% .....	84
II.2. La compression 70% .....	89
<b>III. Evaluation des propriétés mécaniques par des méthodes ciblées .....</b>	<b>91</b>
III.1. La pénétrométrie.....	91
III.2. La traction sur pellicule .....	94
III.3. La traction sur pédicelle .....	97
<b>IV. Discussion.....</b>	<b>99</b>
<b>V. Conclusion .....</b>	<b>101</b>
<b>Chapitre 2 : Hétérogénéité physique et physiologique au sein d'une grappe de raisin de Cabernet Franc et impact sur les propriétés mécaniques durant la maturation. ....</b>	<b>103</b>
<b>I. Evolution des propriétés mécaniques des baies de raisin au cours de la maturation. ...</b>	<b>104</b>
I.1. Mesure de la variabilité des paramètres de double compression .....	104
I.2. Evolution de la texture au cours de la maturation. ....	106
<b>II. Evolution des principaux paramètres physiques et physiologiques au cours de la maturation. ....</b>	<b>109</b>
<b>III. Liens entre l'évolution des propriétés mécaniques et l'évolution des paramètres physiques et physiologiques. ....</b>	<b>113</b>
III.1. Analyse des corrélations .....	114
III.2. Modélisation de l'évolution de la texture des raisins au cours de la maturation. ...	116
<b>IV. Etude de l'effet position des baies sur l'hétérogénéité des grappes de raisin. ....</b>	<b>120</b>
<b>V. Discussion .....</b>	<b>126</b>

<b>VI. Conclusion .....</b>	<b>131</b>
<b>Chapitre 3 : Etude de l'exposition des baies sur l'hétérogénéité des grappes de raisin Cabernet Franc au cours du millésime 2012.....</b>	<b>132</b>
<b>I. Comparaison des millésimes 2011 et 2012 .....</b>	<b>133</b>
<b>II. Comparaison de l'évolution des paramètres de double compression en fonction de l'exposition.....</b>	<b>138</b>
<b>III. Conclusion.....</b>	<b>145</b>
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>148</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>154</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>170</b>

## *Liste des Tableaux*

<b>Tableau 1. Classification des composés phénoliques du raisin (d'après Flanzy, 1998) .....</b>	<b>21</b>
<b>Tableau 2. Caractéristiques des parcelles sélectionnées pour le dispositif expérimental. ..</b>	<b>59</b>
<b>Tableau 3. Récapitulatif des dates de prélèvement pour le millésime 2010. ....</b>	<b>63</b>
<b>Tableau 4. Récapitulatif des dates de prélèvement pour le millésime 2011. ....</b>	<b>63</b>
<b>Tableau 5. Récapitulatif des dates de prélèvement pour le millésime 2012. ....</b>	<b>64</b>
<b>Tableau 6. Dates de prélèvements et numéros de grappes associés pour les millésimes 2011 et 2012. ....</b>	<b>67</b>
<b>Tableau 7. Probabilité associées aux analyses de variance à deux facteurs pour les paramètres de double compression 20%. ....</b>	<b>85</b>
<b>Tableau 8. Evolution des paramètres de double compression 20% en fin de maturation... 87</b>	<b>87</b>
<b>Tableau 9. Probabilité associées aux analyses de variance à deux facteurs pour les paramètres de compression 70%. ....</b>	<b>89</b>
<b>Tableau 10. Evolution des paramètres de compression 70% en fin de maturation. ....</b>	<b>90</b>
<b>Tableau 11. Probabilité associées aux analyses de variance à deux facteurs pour les paramètres de pénétrométrie. ....</b>	<b>92</b>
<b>Tableau 12. Evolution des paramètres de pénétrométrie en fin de maturation.....</b>	<b>93</b>
<b>Tableau 13. Probabilité associées aux analyses de variance à deux facteurs pour les paramètres de traction sur pellicule.....</b>	<b>95</b>
<b>Tableau 14. Evolution des paramètres de traction sur pellicule en fin de maturation. ....</b>	<b>96</b>
<b>Tableau 15. Probabilité associées aux analyses de variance à deux facteurs pour les paramètres de traction sur pédicelle.....</b>	<b>98</b>
<b>Tableau 16. Comparaison du paramètre Fmax entre les variétés Cabernet Franc et Chenin. ....</b>	<b>99</b>
<b>Tableau 17. Coefficient de corrélation de Pearson entre les paramètres de double compression à la récolte .....</b>	<b>106</b>
<b>Tableau 18. Analyse de variance en fonction de la date pour les paramètres de double compression en 2011.....</b>	<b>107</b>
<b>Tableau 19. Coefficients de corrélation entre les paramètres physiques physiologiques et texturaux durant la maturation. ....</b>	<b>115</b>
<b>Tableau 20. Comparaison de modèles non linéaires. ....</b>	<b>118</b>

<b>Tableau 21 Modélisation de l'évolution des paramètres de double compression en fonction des paramètres physiques et physiologiques (n=10).....</b>	<b>119</b>
<b>Tableau 22. Proportion relative de baies situées sur les deux premières branches de la grappe. ....</b>	<b>121</b>
<b>Tableau 23 Paramètres physiques, physiologiques et texturaux en fonction de la position des baies sur la grappe à trois périodes différentes de la maturation.....</b>	<b>123</b>
<b>Tableau 24. Test de comparaison d'échantillonnage en grappe entière et échantillonnage des baies en milieu de grappe.....</b>	<b>126</b>
<b>Tableau 25. Analyse de variance en fonction du facteur millésime.....</b>	<b>134</b>
<b>Tableau 26. Analyse de variance des principaux paramètres physiques, physiologiques et texturaux en fonction de l'exposition des grappes, en début et fin de maturation. ....</b>	<b>141</b>
<b>Tableau 27. Résultats de l'ANOVA des paramètres de double compression en fonction de la position des baies sur la grappe, en début et fin de maturation pour les deux modalités ombre et lumière.....</b>	<b>143</b>

### *Liste des Figures*

<b>Figure 1. Anatomie d'une grappe et d'une baie de raisin.....</b>	<b>9</b>
<b>Figure 2. Structure du pépin de raisin à 11 jours après floraison marqué au bleu de toluidine .....</b>	<b>10</b>
<b>Figure 3. Schéma des phases de développement de la baie de raisin .....</b>	<b>12</b>
<b>Figure 4. Photo d'une grappe de raisin Cabernet Franc à la véraison. ....</b>	<b>13</b>
<b>Figure 5. Evolution des composés d'intérêt majeurs au cours de la maturation.....</b>	<b>15</b>
<b>Figure 6. Principe de dosage enzymatique des sucres. ....</b>	<b>18</b>
<b>Figure 7. Photos des différents outils adaptés à la mesure de propriétés mécaniques du raisin.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure 8. Courbe Force/Temps d'un profil TPA (Double compression). ....</b>	<b>29</b>
<b>Figure 9. Exemple de courbe Force/déplacement issue de la mesure de pénétrométrie sur raisin.....</b>	<b>30</b>
<b>Figure 10. Evolution des paramètres de double compression 20% au cours de la maturation de Cabernet Franc .....</b>	<b>32</b>

<b>Figure 11. Représentation schématique de l'organisation de la paroi primaire chez les dicotylédones.....</b>	<b>34</b>
<b>Figure 12. Séquence primaire et modèle structural de la cellulose. ....</b>	<b>35</b>
<b>Figure 13. Schéma du flux osmotique entre deux solutions de concentrations différentes séparées par une membrane semi perméable.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure 14. Différentes échelles de climat en viticulture. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figure 15. Méthode d'échantillonnage sur un cep de vigne.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 16. Schéma récapitulatif de la démarche expérimentale adoptée. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figure 17. Localisation géographique des sept parcelles du dispositif expérimental. ....</b>	<b>61</b>
<b>Figure 18. Localisation des ceps et numéro des grappes prélevées au cours du millésime 2011.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure 19. Localisation des ceps et numéros des grappes prélevées au cours du millésime 2012. Les grappes numérotées en bleues et cerclées de noir correspondent à celles ayant un dispositif d'ombrage. ....</b>	<b>66</b>
<b>Figure 20. Photo du dispositif d'ombrage des grappes.....</b>	<b>67</b>
<b>Figure 21. Système de planche à trous permettant de répartir aléatoirement 100 baies. ..</b>	<b>69</b>
<b>Figure 22. Schéma représentatif de la classification des baies en fonction de leur position sur la grappe. ....</b>	<b>70</b>
<b>Figure 23. Courbe obtenue à l'issu d'un cycle de double compression 20%.....</b>	<b>71</b>
<b>Figure 24. Courbe obtenue par compression à 70% des baies. ....</b>	<b>72</b>
<b>Figure 25. Courbe obtenue après la mesure de pénétrométrie sur baie entière. ....</b>	<b>73</b>
<b>Figure 26. Dispositif expérimental de traction sur pédicelle.....</b>	<b>74</b>
<b>Figure 27. Courbe obtenue après traction sur pédicelle.....</b>	<b>74</b>
<b>Figure 28. Schéma d'obtention des éprouvettes rectangulaires homogènes de pellicule de raisin.....</b>	<b>75</b>
<b>Figure 29. Courbe obtenue après traction sur pellicule.....</b>	<b>76</b>
<b>Figure 30. Lyophilisation des baies. ....</b>	<b>77</b>
<b>Figure 31. Comparaison des coefficients de variation entre les variétés Chenin et Cabernet Franc pour chacun des paramètres de texture étudié.....</b>	<b>84</b>
<b>Figure 32. Analyse en composante principale des paramètres de double compression 20%. ....</b>	<b>88</b>

Figure 33. Analyse en composante principale des paramètres de compression 70%. .....	91
Figure 34. Analyse en composante principale des paramètres de pénétrométrie.....	94
Figure 35. Analyse en composante principale des paramètres de traction sur pellicule. ....	97
Figure 36. Analyse en composante principale des paramètres de traction sur pédicelle. ...	98
Figure 37. Coefficient de variation (CV%) sur l'ensemble des paramètres de texture en 2011.....	105
Figure 38. Evolution des coefficients de variation au cours de la maturation.....	105
Figure 39. Evolution des paramètres de double compression 20% au cours de la maturation du millésime 2011 .....	108
Figure 40. Différences observées entre les valeurs moyennes de W1 et W2 au cours de la maturation. ....	109
Figure 41. Evolution des principaux paramètres physiques au cours de la maturation.....	111
Figure 42. Nombre moyen de pépins par baie associé au nombre de baie par grappe. ....	112
Figure 43 Evolution de paramètres physiologique au cours de la maturation. ....	113
Figure 44. Matrice des nuages de points du paramètre Grad1 et des variables qui lui sont corrélées.....	116
Figure 45. Graphique du modèle linéaire ajusté entre Grad1 et °Brix. ....	117
Figure 46. Modèle réciproque double ajusté. ....	119
Figure 47. Schéma récapitulatif des liens entre l'évolution de la fermeté des baies et des paramètres physiques et physiologiques. Les résultats sont basés sur les coefficients de Pearson entre le F1 et les paramètres physiques et physiologiques. ....	120
Figure 48. Courbes de fréquence de distribution de la densité en fonction de la position pour des grappes récoltées en fin de maturation. ....	125
Figure 49. Moyenne des °Brix et densité en fonction du nombre croissant de pépin par baie.....	135
Figure 50. Résultats de l'analyse en composante principale effectuées sur les données issus des 5 dates communes entre les millésimes 2011 et 2012.....	136
Figure 51. Comparaison de l'évolution des paramètres de double compression au cours de la maturation entre les millésimes 2011 (trait rouge ; marqueur carré) et 2012 (trait bleu ; marqueur losange). ....	137

---

<b>Figure 52. Evolution des composés d'intérêt majeurs au cours de la maturation d'après Rotter (2004) intégrant l'évolution de la maturité texturale pour la variété Cabernet Franc.</b>	
.....	138
<b>Figure 53. Evolution au cours de la maturation des paramètres de double compression en fonction de l'exposition des grappes.</b>	140
<b>Figure 54. Résultats de l'analyse en composante principale (ACP) appliquées aux paramètres de double compression et le paramètre « précipitations ».</b>	142
<b>Figure 55. Evolution de la température moyenne (°C) au cours des millésimes 2011 et 2012 pour la station météorologique de Montreuil-Bellay.</b>	174
<b>Figure 56. Evolution de précipitations (mm) au cours des millésimes 2011 et 2012 pour la station météorologique de Montreuil-Bellay.</b>	174
<b>Figure 57. Evolution de la durée d'insolation (heures) au cours des millésimes 2011 et 2012 pour la station météorologique de Montreuil-Bellay.</b>	175
<b>Figure 58. Evolution du rayonnement global (J/cm<sup>2</sup>) au cours des millésimes 2011 et 2012 pour la station météorologique de Montreuil-Bellay.</b>	175



# Introduction générale



## Introduction générale

Ce travail de thèse réalisé au sein de l'Unité de Recherche GRAPPE du Groupe ESA d'Angers s'inscrit dans le cadre des projets scientifiques collaboratifs de l'Unité Mixte Technologique VINITERA qui regroupe des organismes de recherche (INRA-UEVV Angers), de l'enseignement supérieur (ESA-Unités de Recherche GRAPPE et LARESS) et du développement (Institut Français de la Vigne et du Vin, Pôle Val de Loire-Centre et l'Association Cellule Terroirs Viticoles). Un des objectifs de recherche dans le cadre de cette collaboration, est de pouvoir déterminer de façon précise la qualité de la vendange à l'aide d'outils permettant une approche multicritères, et d'y relier la qualité des vins associés, tout en intégrant l'influence que peuvent avoir sur ces qualités certains actes techniques comme le choix de la date des vendanges ou encore les processus de vinification.

Dans ce contexte, la composition physico-chimique de la baie de raisin de cuve à la récolte est d'une importance cruciale pour la qualité et la stabilité des vins finaux (Flanzy, 1998). Les événements physiologiques et biochimiques majeurs influençant la qualité finale du raisin ayant lieu essentiellement durant la phase maturation, c'est autour de cette étape clé du développement de la baie de raisin que s'est axé ce travail de thèse. De manière traditionnelle, la qualité du raisin est définie par des indices de maturité basés sur la teneur en sucre, en acides et en composés phénoliques. Cependant, beaucoup de professionnels du secteur viti-vinicole ont réalisé que ces indicateurs étaient insuffisants pour décider plus en amont du choix de l'itinéraire technique de vinification, car ils ne représentent que partiellement la qualité des raisins (Failla et al, 2005). Une approche multicritères de la qualité permettrait de fournir, aux producteurs et techniciens de la filière viti-vinicole, des indicateurs fiables pour (i) optimiser le choix de la date de la récolte proprement dite, (ii) une meilleure évaluation de la qualité potentielle de la récolte et (iii) permettre d'anticiper la sélection de l'itinéraire de vinification adéquat pour offrir des vins adaptés au marché et aux exigences des consommateurs. Mieux connaître la variabilité de la qualité des raisins permettrait de tendre vers une viticulture de précision.

Sur la base de ce constat, une nouvelle notion a récemment été introduite sous le terme général de "texture", en tant que critère complémentaire aux indicateurs traditionnels permettant une évaluation plus complète de la qualité des raisins (Letaief, 2007; Letaief et

al, 2008 ; Le Moigne et al, 2008; Zouid et al, 2010; Maury et al, 2009; Torchio et al, 2010; Rio Segade et al, 2011 ; Rolle et al, 2012). Cet indicateur, permet entre autres, d'évaluer l'assouplissement et le ramollissement des baies de raisin au cours de la maturation (Coombe et Philips, 1982) par la mesure de leurs propriétés mécaniques. Deux thèses de doctorat effectuées précédemment au sein de l'unité de recherche GRAPPE (Le Moigne, 2008 ; Zouid, 2011) ont permis de démontrer l'intérêt d'appréhender, à l'échelle d'une parcelle, la qualité texturale des raisins du cépage Cabernet Franc, respectivement par une approche sensorielle et par une approche instrumentale. Les résultats ont montré que par une approche sensorielle de la texture, il était possible de différencier des raisins selon leur parcelle d'origine, leur millésime et leur stade de maturité (Le Moigne, 2008). Les travaux de thèse d'Imen Zouid, portant sur la recherche d'un lien entre l'évolution des propriétés mécaniques des baies de raisin et l'extractibilité en solutions modèles des composés phénoliques (Zouid et al, 2011), ont donné des résultats encourageants, mais ont également soulevé de nouveaux verrous techniques et scientifiques notamment sur le fait qu'il était difficile par une approche instrumentale de différencier des stades de maturité différents.

Ce problème était-il dû à des méthodes instrumentales inadaptées ? Ou à des protocoles d'échantillonnage globaux représentatifs de la parcelle adaptés à l'évaluation de la maturité technologique ou phénolique mais non à l'étude de la maturité texturale ? En effet, pour les indicateurs classiques de maturité (taux de sucre, acidité et pH), les valeurs sont issues de lots de 200 à 300 baies de raisins issus d'un échantillonnage global représentatif de la parcelle (les raisins sont broyés et les mesures sont effectuées sur le jus extrait). Pour les mesures de texture sur raisins, l'analyse est effectuée baie à baie sur un lot d'une trentaine de baies. Dans ce cas, la représentativité de l'échantillonnage et l'hétérogénéité existant entre chaque baie est d'autant plus importante à prendre en compte étant donné la variabilité physiologique de chaque baie au sein des grappes et au sein de chaque cep. Or, l'impact de la variabilité des propriétés mécaniques des raisins à différentes échelles : de la parcelle jusqu'à la baie sur, est encore mal connu.

Bien que prometteuse, la mesure instrumentale de la texture des baies n'est pas encore un critère couramment utilisé en viticulture pour suivre et évaluer la maturité optimale du raisin. Dans ce contexte, l'identification des facteurs physiques et physiologiques impliqués dans l'évolution des propriétés mécaniques du raisin, devrait permettre de mieux

comprendre les déterminants de la texture contribuant à la qualité des raisins et d'en optimiser l'évaluation à différentes échelles de mesure.

Ce manuscrit de thèse s'articulera comme suit:

Dans un premier temps, une étude bibliographique basée sur l'état de l'art en lien avec les principales problématiques du sujet de thèse, à la suite de laquelle une section présentera la démarche scientifique générale adoptée dans le cadre de ce travail de thèse.

La section suivante décrit les matériels et méthodes utilisés au cours des différents travaux de thèse.

La dernière section expose les résultats des principaux travaux effectués au cours de la thèse et les discussions qui leurs sont associées. Cette section s'articule en trois chapitres.

Le **chapitre 1** décrit les travaux effectués au cours du premier millésime d'expérimentation en 2010. Il porte essentiellement sur la comparaison de l'évolution des propriétés mécaniques de raisins issus de cépages Cabernet Franc et Chenin en fin de la maturation. Le but de cette étude était de tester plusieurs méthodes instrumentales de mesure de la texture sur deux variétés de raisins de cuve afin d'évaluer leur capacité de discrimination et de sélectionner la variété et la méthode de texture les plus adaptées pour la suite des travaux de thèse.

Le **chapitre 2** présente les résultats du millésime 2011 obtenus sur l'étude baie à baie de la texture de raisins Cabernet Franc par des mesures de double compression au cours de la maturation. Parallèlement à ces mesures, des paramètres liés à l'hétérogénéité physique et physiologique des baies au sein des grappes ont également été analysés.

Le **chapitre 3** s'intéresse à l'impact du macroclimat des grappes sur les mesures de texture au cours du millésime 2012.

Enfin, une conclusion fait un bilan des réponses apportées par ces travaux face aux objectifs et hypothèses initiaux. Cette partie dresse également des perspectives de travaux scientifiques traitant des questions soulevées par ce travail et ainsi que leurs applications potentielles.



# **Etude bibliographique**



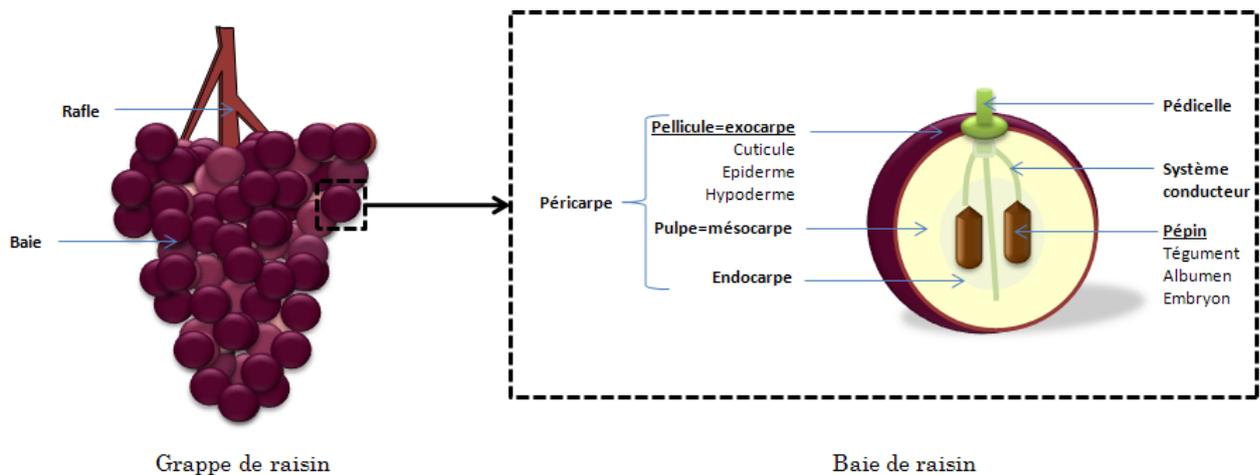
## **Etude bibliographique**

La première partie de cette étude bibliographique est consacrée aux aspects liés à la morphologie et au développement du matériel végétal utilisé au cours de cette thèse: la baie de raisin. La deuxième partie de cette étude est un focus sur la période clé du développement de la baie de raisin qu'est la maturation, au cours de laquelle surviennent les principaux changements en lien avec la qualité finale du raisin. La troisième partie introduit la notion d'évaluation de la texture par des méthodes instrumentales. Elle présente les différentes méthodologies développées chez le raisin afin d'étudier leurs propriétés mécaniques. Une quatrième partie s'intéresse au rôle déterminant que jouent la paroi des cellules et l'eau dans l'évolution des propriétés mécaniques des baies de raisin. Enfin la quatrième et dernière partie de cette synthèse bibliographique expose les principaux facteurs pouvant être impliqués dans l'hétérogénéité physico-chimique des baies de raisin et devant alors être considérés pour mieux comprendre la variabilité des données de propriétés mécaniques.

## **I. Approche macroscopique de la grappe de raisin**

### **I.1. Morphologie de la baie de raisin**

La vigne cultivée (*Vitis vinifera* L.) est une plante essentiellement autogame. Suite à la fécondation, les fleurs issues de ses inflorescences conduisent à des grappes de raisin. Ces grappes sont composées d'une rafle, partie ligneuse et ramifiée, sur laquelle sont rattachées des baies via un pédicelle. Ces baies appartiennent à la famille des fruits simples aux péricarpes entièrement charnus. Elles se divisent en trois parties: la pellicule (ou exocarpe), la pulpe (ou mésocarpe) et les pépins (Coombe et al, 1987). On nomme péricarpe l'ensemble constitué de l'exocarpe, du mésocarpe et de l'endocarpe situé à proximité des loges carpellaires (Figure 1).



**Figure 1. Anatomie d'une grappe et d'une baie de raisin.**

### **I.1.1. La pellicule**

La pellicule de raisin correspond à l'enveloppe extérieure de la baie. Son poids représente en moyenne 10 à 15% du poids final. Elle peut être divisée en trois parties :

- La couche la plus externe est la cuticule. Elle est composée de polysaccharides et d'acides gras hydroxylés, et est recouverte d'une couche de cires hydrophobes : la pruine. Chez les végétaux cette couche cuticulaire sert de barrière protectrice contre certains pathogènes mais aussi limite les pertes en eau par transpiration et dans certains cas, protège des dommages causés par des blessures mécaniques (Heredia, 2003).

- La couche de cellules de l'épiderme est constituée de une à deux assises de cellules isodiamétriques dont la largeur peut varier de 6,5 à 10  $\mu\text{m}$  (Alleweldt et al, 1981).

- La couche interne, appelée hypoderme, est composée de 10 à 12 assises de cellules dont la largeur est comprise entre 100 et 250  $\mu\text{m}$ . Leurs vacuoles contiennent la majorité des composés phénoliques de la pellicule.

### **I.1.2. La pulpe (mésocarpe)**

Il s'agit par sa taille, de la partie la plus importante du fruit (>80% du poids final de la baie). Elle est constituée d'une assise allant de 25 à 30 couches de cellules (Ollat et al, 2002). Au cours du développement de la baie, la taille des cellules augmente en lien avec une augmentation de celle de la vacuole qui peut représenter jusqu'à 99% du volume cellulaire

(Diakou et Carde, 2001). La région la plus interne du fruit est composée de fines couches de cellules délimitant les loges carpellaires dans lesquelles se trouvent les pépins. Elle se compose essentiellement d'eau, de sucres et d'acides organiques.

### I.1.3. Les pépins

Ils représentent jusqu'à 6% du poids total de la baie. En principe, en nombre de quatre dans la plupart des cépages, leur nombre peut varier à la suite de mauvaises fécondations des fleurs. Le pépin de raisin est composé de 5 zones distinctes visibles sur une coupe histologique (Figure 2) (Amrani Joutei et Glories, 1995 ; Cadot et al, 2006):

- la cuticule et l'épiderme ;
- l'enveloppe externe, composée de larges cellules parenchymateuses ;
- l'enveloppe moyenne, fortement sclérifiée et composée de 2 couches de cellules ;
- l'enveloppe interne, formée de trois assises de cellules ;
- l'albumen et l'embryon

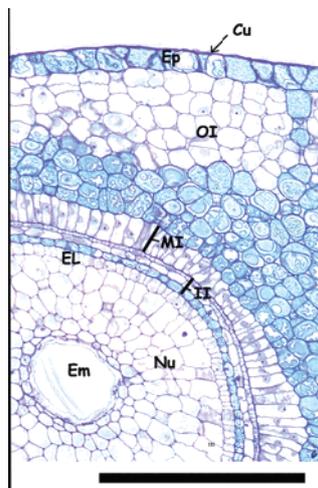


Figure 2. Structure du pépin de raisin à 11 jours après floraison marqué au bleu de toluidine (Cadot et al, 2006). Cuticule (Cu), épiderme (Ep), enveloppe externe (OI), enveloppe moyenne (MI), Enveloppe interne (II), albumen (Nu), embryon (Em). Bar= 10  $\mu\text{m}$ .

## I.2. Développement de la baie de raisin

Trois phases distinctes sont observées lors du développement de la baie (Figure 3) :

### **I.2.1. Phase 1 : Phase de croissance herbacée (ou stade vert)**

Ayant lieu après la floraison et la nouaison (fin juin, début juillet pour l'hémisphère nord), cette première phase de développement dure de 45 à 65 jours selon le cépage et les conditions environnementales. D'après Ojeda et al (1999), elle peut être divisée en trois périodes. La première période débute à l'anthèse et s'achève environ cinq jours après. Elle est caractérisée par de nombreuses divisions cellulaires à l'origine de l'augmentation du volume de la baie et non à l'élargissement des cellules. La majorité des divisions cellulaires a lieu jusqu'à 10 jours après anthèse (Coombe, 1960), fixant ainsi le nombre définitif de cellules de la baie (Coombe, 1973; Dokoozlian, 2002). La deuxième période dure de 5 jours à 35 jours après l'anthèse. Elle se caractérise par un ralentissement des divisions cellulaires et par l'induction de l'expansion des cellules. Cette expansion est principalement due à une accumulation d'eau et d'acides organiques (acides malique et tartrique essentiellement) dans les vacuoles (Possner et Kliewer, 1985). La troisième période représente la dernière semaine de la phase 1 du développement de la baie, au cours de laquelle les divisions cellulaires s'arrêtent complètement, alors que l'expansion cellulaire continue. A l'issue de cette première phase de croissance, la baie est ferme et de couleur verte par la présence dans les cellules de la pellicule de chlorophylle, pigment prédominant durant cette phase. L'activité métabolique est soutenue et caractérisée par une intensité respiratoire élevée et une accumulation rapide d'acides, notamment d'acide malique et d'acide tartrique.

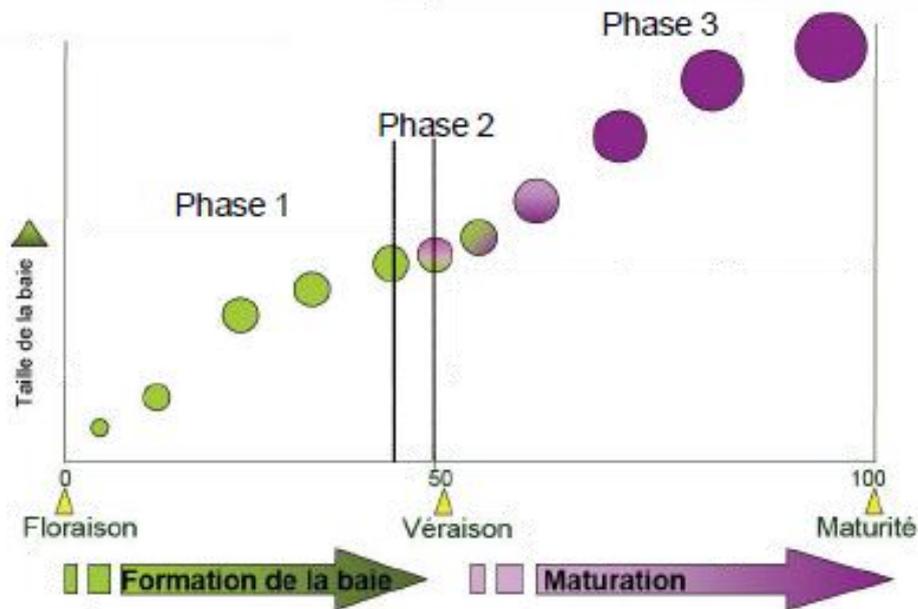


Figure 3. Schéma des phases de développement de la baie de raisin (d'après Kennedy, 2002).

### I.2.2. Phase 2 : Phase de ralentissement de croissance (« plateau herbacé »)

Cette phase dure deux à trois semaines. Elle est caractérisée par un arrêt ou un ralentissement de la croissance qui sépare la croissance herbacée de la phase de maturation du fruit. Les baies restent fermes, et les acides organiques atteignent leur concentration maximale. A la fin de cette phase, le taux de chlorophylle commence à baisser (Dokoozlian, 2002).

### I.2.3. Phase 3 : Seconde phase de croissance : la maturation

Cette troisième phase débute par la véraison (Kennedy, 2002). Il s'agit d'un phénomène brutal à l'échelle de la baie qui se caractérise par un brusque ramollissement du fruit et un changement de couleur, passant du vert au rouge (variétés de raisins rouge) (Figure 4) ou du vert au jaune translucide (variétés de raisins blancs). A l'échelle de la parcelle, elle s'échelonne sur 8 à 15 jours. La véraison est marquée par trois phénomènes physiologiques importants :

- la diminution de l'acidité totale ;
- l'augmentation de la teneur en sucres par accumulation des sucres issus de la photosynthèse et conversion de l'acide malique. La baie se comporte comme un organe de stockage ;

-l'évolution des composés phénoliques : c'est le début de la synthèse des anthocyanes, entraînant un changement de la couleur des baies pour les variétés rouges.



**Figure 4. Photo d'une grappe de raisin Cabernet Franc à la véraison.**

La phase de maturation dure de 35 à 65 jours. A ce stade le grossissement des baies est essentiellement dû à l'expansion cellulaire. La déformabilité de la baie augmente et l'élasticité de la pellicule diminue. Le potentiel d'expansion des cellules est influencé par la plasticité de la paroi, la turgescence qui dépend des flux d'eau et de la concentration et la distribution en osmolytes (Cleland, 1971). Le xylème perd sa fonctionnalité après la véraison et le phloème assure l'essentiel des transports durant la maturation du raisin (Carbonneau et al, 2007). Durant cette phase, on observe une diminution de l'acidité provoquée par l'utilisation des acides dans l'activité respiratoire, par leur dilution via les flux d'eau et par la transformation de l'acide malique en sucres réducteurs (glucose et fructose).

Les sucres réducteurs sont également issus de la photosynthèse qui a lieu dans les feuilles. La maturation est aussi caractérisée par l'accumulation d'autres molécules essentielles à la qualité du vin comme, les composés phénoliques et les précurseurs d'arômes.

## II. La maturation : Une combinaison de plusieurs types de maturité

### II.1. Introduction

La maturation des baies de raisin est définie comme la période qui conduit de la véraison à la maturité optimale qui est définie en fonction du cépage et du produit à élaborer. C'est au cours de cette période qu'ont lieu les événements biochimiques majeurs impactant la qualité finale des raisins. On distingue plusieurs types de maturités selon l'évolution de composés biochimiques (

**Figure 5**) ou d'étapes clés de développement de la vigne ou des raisins. Blouin et Guimberteau (2000) ont défini les différentes maturités décrivant l'évolution des principaux constituants de la baie de raisin:

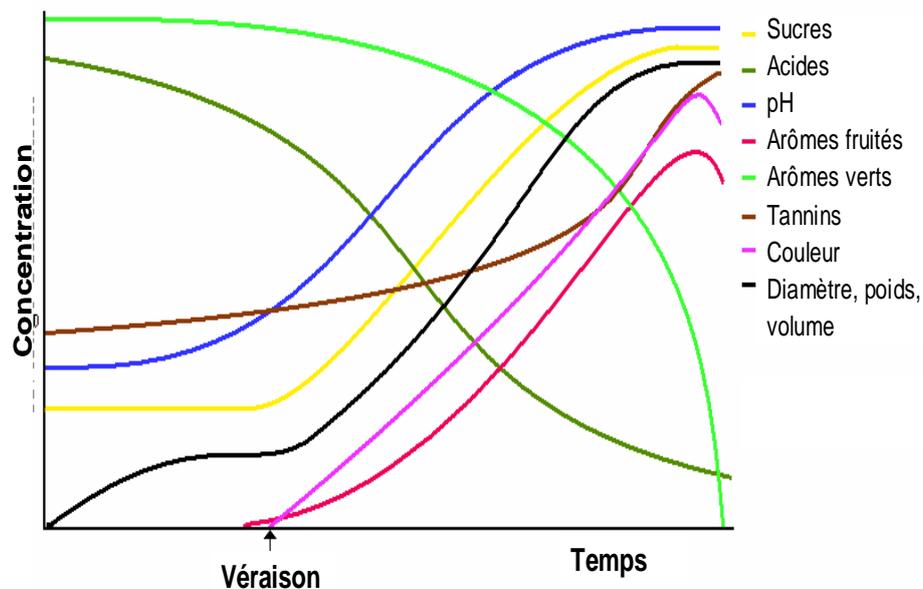
**La maturité physiologique** : Les pépins sont aptes à germer, la vigne peut se reproduire. Cette maturité intervient peu après la véraison.

**La maturité phénologique** : Elle témoigne du rythme biologique annuel de la vigne et correspond aux périodes et durées des différentes phases de développement repères de la vigne telles que la floraison, la véraison ou la phase de maturation proprement dite. Ces périodes qui peuvent être considérées comme constantes d'une année à l'autre sont essentielles pour le choix de la date optimale de récolte (Carbonneau et al, 2007). Par exemple, la durée moyenne en jours entre la mi- véraison et la date de récolte pour le Cabernet Franc est de 48 jours environs. Cette durée moyenne peut varier cependant pour une région donnée en fonction du millésime, la précocité des stades phénologiques de ce cépage étant fortement affectée par le climat de l'année. D'autres variables telles que le porte-greffe ou la conduite du vignoble sont également des facteurs pouvant influencer cette durée.

**La maturité technologique** : Ce terme défini selon le cas, la concentration maximale atteinte en sucres, la teneur minimale en acidité totale, la quantité maximale de sucres à l'hectare, ou le rapport sucre sur acidité totale (S/AT). Selon le type de vin, les conditions climatiques, la région de production et le millésime, le vinificateur devra trouver le meilleur compromis entre la teneur en sucres et l'acidité totale au moment de la récolte.

**La maturité phénolique :** Elle correspond au potentiel maximum en anthocyanes et autres composés phénoliques (les tanins) contenus dans les cellules de la pellicule et dans les pépins. Les parois des cellules de la pellicule doivent être suffisamment dégradées pour permettre une bonne extraction des anthocyanes. La teneur en composés phénoliques totaux (dosage spectrophotométrique à 280 nm), la teneur en anthocyanes (dosage à 520 nm) ou le rapport anthocyanes/tanins sont les indicateurs classiques de la maturité phénolique.

**La maturité aromatique :** Témoigne de l'évolution des arômes et de leurs précurseurs au cours de la maturation. Le potentiel aromatique déterminé par des analyses sensorielles de baies est utilisée plus souvent comme l'indicateur de la maturité aromatique. Il est possible de quantifier les composés d'arômes à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse (Palomo et al, 2007).



**Figure 5. Evolution des composés d'intérêt majeurs au cours de la maturation (d'après Rotter, 2004).**

L'estimation de la qualité des raisins pour déterminer la date de vendange optimale a longtemps été basée sur des critères empiriques laissés à la libre appréciation de chaque viticulteur. Ces critères qualitatifs font appels à plusieurs sens du vigneron. Le goût et l'odorat permettent surtout d'évaluer le taux de sucre, l'acidité, l'astringence et les arômes

des raisins. Avec la vue il peut apprécier leur couleur, une baie bien rouge et des pépins de couleur sombre indiquent un bon état d'avancement de la maturité. Le toucher permet d'estimer l'état de ramollissement ou encore la facilité à détacher le pédicelle d'une baie. Grâce à l'avancée de la science, ces évaluations empiriques ont trouvé une correspondance scientifique par des méthodes de laboratoire ou de terrain permettant une mesure quantitative, représentative et répétable de différents paramètres de la qualité. Ces méthodes varient selon leur coût plus ou moins important, leur temps d'échantillonnage et de préparation des échantillons, la facilité d'utilisation, la disponibilité des appareils de mesure ou encore le niveau de qualification requis des techniciens. Dans la partie suivante nous nous sommes intéressés aux composés chimiques constituant les maturités technologiques, phénoliques ainsi que des moyens scientifiques de leur identification et quantification.

## **II.2. Les composés de la maturité technologique**

### **II.2.1. Les sucres réducteurs**

Les sucres présents dans la baie sont essentiellement représentés par des hexoses ( $C_6H_{12}O_6$ ), glucose et fructose qui sont des oses réducteurs fermentescibles. On trouve également en plus faible quantité du saccharose et des oses non fermentescibles comme les pentoses (Galet, 2000 ; Blouin et Guimberteau, 2000).

Le saccharose est produit dans les feuilles au cours de la photosynthèse et est transporté via le phloème vers les autres organes de la plante (sarments, pétioles, rafles). À la véraison, la baie devient l'organe puits prioritaire (Blouin et Guimberteau, 2000). L'apport en sucres dans la baie augmente brusquement, allant jusqu'à 6 fois la quantité initiale (Galet, 2000). Le saccharose est déchargé dans la baie à la fois par la voie symplastique et apoplastique (Boss et Davies, 2001) mais ne s'y accumule quasiment pas (Riberau-Gayon et Peynaud, 1971) et est directement transformé en glucose et fructose par l'action d'invertases (Carbonneau et al, 2007). Au cours de la maturation, environ 5% des hexoses proviennent aussi de la transformation de l'acide malique contenu dans la baie (Carbonneau et al, 2007). À maturité optimale, les teneurs en oses réducteurs varient de 160 à 250 g/L (Blouin et Guimberteau, 2000 ; Riberau-Gayon et Peynaud, 1971) en fonction des cépages, du millésime et de la conduite de la vigne en fonction. Le rapport glucose/fructose (G/F) varie constamment au

cours de la maturation mais au moment de la maturité le rapport moyen G/F est de 0,95 (Galet, 2000 ; Riberau-Gayon et Peynaud, 1971).

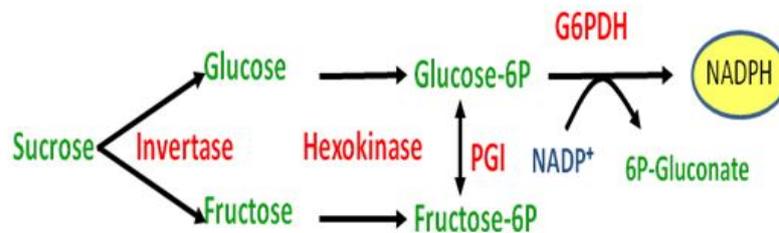
### II.2.2. Mesure du taux de sucre

**La réfractométrie** est une méthode optique couramment utilisée pour estimer le taux de sucre sur les moûts de raisin. Cette méthode utilise le principe de réfraction de la lumière, d'après lequel un faisceau lumineux est dévié différemment selon la nature du milieu dans lequel il se propage. Une des unités généralement utilisée est le **degré Brix (°Bx)** où 1° Bx = 1 g de saccharose pour 100 g de solution. Si la solution n'est pas uniquement composée de saccharose comme c'est le cas chez le raisin, alors le degré Brix est une estimation du pourcentage total de solides solubles présents dans la baie. Or dans le raisin 90% des solides solubles sont représentés par les sucres. On peut donc considérer que chez le raisin, la valeur de Brix est une bonne approximation de la quantité de sucre dans l'échantillon. Les résultats obtenus en °Bx permettent le calcul de la concentration de solides solubles en grammes par litre à l'aide d'un tableau d'équivalence d'évaluation de la teneur en sucre-réfractométrie du Recueil des Méthodes International d'Analyse de vins et de moûts de l'OIV (Annexe 1).

**La densimétrie** associée à la mesure de la température à 20°C sur jus en utilisant un « mustimètre », permet d'estimer le ratio de la densité d'un moût sur la densité de l'eau. Le **degré Baumé (°Bé)** :  $1\text{ }^\circ\text{Bé} = \text{°Bx}/0,55$ , ou le degré Oeshlé (vignobles d'Alsace) sont des unités utilisées. La densimétrie peut également se faire directement sur les baies par flottaison dans des solutions de concentration connues en chlorure de sodium (NaCl). Le principe consiste à faire passer successivement les baies de raisins dans des solutions de concentration croissante de NaCl. Si la baie coule, sa densité est supérieure à celle de la solution si elle flotte sa densité est inférieure ou égale à celle de la solution. Plus l'écart entre les différentes solutions de NaCl est faible, plus précise sera l'estimation de la densité des baies. D'après Fournand et al (2006), 10 g/L de NaCl correspondent à environ 17 g/L de solides solubles totaux.

**Le dosage chimique** des oses réducteurs dans le moût ou le vin par la méthode de Fehling est réalisé par un mélange d'une solution de sulfate de cuivre et de sel de Seignette (tartrate double de sodium et de potassium) en présence de soude. Son principe repose sur la réduction de l'oxyde cuivrique  $\text{CuO}$  en oxyde cuivreux  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Les oses réducteurs sont exprimés en (g/L).

**Le dosage enzymatique** des sucres dont le principe repose, après l'ajout des enzymes hexokinases (HK), phosphoglucose isomérase (PGI) et invertase, sur la transformation proportionnelle du NADP en NADPH en fonction de la quantité de glucose et de fructose contenue dans la solution (**Figure 6**). Le NADPH est détectable à 340 nm. Le résultat est donné en concentration de sucre (g/L).



**Figure 6. Principe de dosage enzymatique des sucres.**

Le sucre est transformé en alcool durant le processus de vinification. Des moûts avec un taux de sucres élevé donneront des vins à fort potentiel alcoolique. Ainsi, à partir des valeurs mesurés de la teneur en sucre du raisin ou d'un jus, il est aussi possible d'estimer le potentiel alcoolique d'un moût en utilisant les formules de conversion suivantes : % d'alcool potentiel = Teneur en sucre (g/L) / 16,38 ou % d'alcool potentiel = 0,59 \* °Brix (où 0,59 correspond au coefficient d'activité de fermentation des levures *Saccharomyces cerevisiae* (Blouin et Guimberteau, 2000).

### II.2.3. Les acides organiques

Les acides organiques jouent un rôle principal dans l'acidité des moûts (Galet, 2000). Les principaux acides sont l'acide malique et l'acide tartrique, qui représentent 90% à 95% de l'acidité des baies (Conde et al, 2007), et dans une moindre mesure l'acide citrique. L'acide malique est la forme d'acide prédominante dans la baie de raisin. Sa synthèse a lieu dans la

mitochondrie au cours de la dégradation des sucres puis il est stocké dans les vacuoles des cellules de la pulpe (Blouin et Guimberteau, 2000). La teneur en acide malique est maximale à l'approche de la véraison, puis décroît au cours de la maturation en lien avec notamment une activité respiratoire importante (Galet, 2000). L'activité métabolique étant liée à la température environnante, les raisins récoltés en régions froides sont toujours plus riches en acide malique que ceux des régions chaudes. Par exemple dans les zones tempérées fraîches, sa concentration dans le moût varie de 4 à 8 g/L, et dans les régions chaudes de 1 à 2 g/L (Blouin et Guimberteau, 2000). À la différence de l'acide malique, l'acide tartrique est peu répandu dans le règne végétal et la vigne constitue une exception. Son origine ne découle pas du métabolisme oxydatif des sucres mais du catabolisme de l'acide L-ascorbique. La seule enzyme à ce jour connue, intervenant dans cette voie de biosynthèse, est la L-idonate déshydrogénase qui catalyse la conversion du L-idonate en acide 5-céto-D-gluconique (Hawker, 1969). En termes de quantité on peut considérer que la teneur en acide tartrique est relativement constante durant la maturation (Galet, 2000). A maturité, sa concentration peut atteindre de 3 à 9 g/L selon les cépages et l'alimentation en eau de la vigne (Blouin et Guimberteau, 2000). Les conditions extérieures influencent la teneur en acide tartrique ainsi une période chaude et sèche augmente son catabolisme et à l'inverse une période pluvieuse provoque un accroissement brusque de sa teneur dans les raisins (Galet, 2000).

#### **II.2.4. Mesures de l'acidité :**

La détermination de l'acidité totale aussi appelée acidité titrable (AT) se fait par titration en neutralisant les acides d'un jus à l'aide d'une solution de soude NaOH titrée généralement à 0,1N en présence de bleu de Bromothymol (BTT) qui sert d'indicateur coloré de fin de réaction. Le volume de soude (mL) donne directement la valeur de l'acidité totale en g/L d' $H_2SO_4$  soit 1mL=1g/L d' $H_2SO_4$ . L'acidité totale peut également s'exprimer en g/L d'acide tartrique ou meq/L. Le rapport S/AT est un signe de l'évolution de la maturation et on considère que des valeurs comprises entre 35 et 50 représentent une bonne qualité de vendange (Dupuch, 1997). La détermination du pH à l'aide d'un pH-mètre permet également de caractériser l'acidité du moût. Le pH d'un jus de raisin à maturité se situe généralement

entre 3 et 4 (3,5 en moyenne) et varie selon la région, le cépage, l'état de maturité et les conditions climatiques.

La mesure directe de la concentration en acide malique et tartrique peut également être réalisée par dosage colorimétrique. L'acide malique en présence de  $\text{NAD}^+$  et de l'enzyme malate deshydrogénase (MDH) induit la formation d'oxaloacétate et de  $\text{NADH}+\text{H}^+$ . L'apparition de NADH est directement mesurable à 340 nm par spectrophotométrie et est proportionnelle à la quantité d'acide malique présent dans l'échantillon. Le dosage de l'acide tartrique repose sur sa réaction en présence de métavanadate qui donne une coloration orangée mesurable à 500 nm par spectrophotométrie.

### **II.3. Les composés de la maturité phénolique**

Ces composés sont des molécules issues du métabolisme secondaire, c'est à dire qu'ils ne sont pas indispensables à la survie des cellules mais jouent cependant un rôle prépondérant dans la physiologie de la plante.

#### **II.3.1. Les composés phénoliques**

Les composés phénoliques sont des déterminants importants de la qualité d'un raisin des raisins rouges, car ils sont responsables de la pigmentation de la baie via les anthocyanes qui par la suite donnent la couleur au vin. Ils sont également responsables de l'astringence qui contribue à la structure et la texture du vin. Ils sont caractérisés par la présence d'un noyau benzénique avec un ou plusieurs groupements hydroxyles. Leur classification est basée sur la distinction entre les composés non flavonoïdes (acides phénols et stilbènes) et flavonoïdes (anthocyanes, flavonols et proanthocyanidins) (Tableau 1).

Tableau 1. Classification des composés phénoliques du raisin (d'après Flanzy, 1998)

COMPOSITION POLYPHÉNOLIQUE DU RAISIN			
NON-FLAVONOÏDES	STILBÈNES		RESVÉRATROL PICEIDE
	ACIDES PHÉNOLS	ACIDES BENZOÏQUES	AC. <i>p</i> -HYDROXYBENZOÏQUE AC. PROTOCATÉCHIQUE AC. VANILLIQUE AC. GALLIQUE AC. SYRINGIQUE AC. GENTYSIQUE AC. SALICYLIQUE
		ACIDES CINNAMIQUES	AC. <i>p</i> -COUMARIQUE AC. CAFÉIQUE AC. FÉRULIQUE
FLAVONOÏDES	FLAVONOLS	(AGLYCONES)	KAEMPFÉROL QUERCÉTOL MYRICÉTOL ISORHAMNÉTOL
	ANTHOCYANES	ANTHOCYANIDINES (AGLUCONES)	MALVIDINE DELPHINIDINE PÉONIDINE PÉTUNIDINE CYANIDINE
	CATÉCHINES		CATÉCHINE EPICATÉCHINE GALLOCATÉCHINE ÉPIGALLOCATÉCHINE
	PROANTHOCYANIDINES	PROCYANIDINES	DÉRIVÉS DE CATÉCHINE ET D'EPICATÉCHINE
		PRODELPHINIDINES	DÉRIVÉS DE GALLOCATÉCHINE ET D'ÉPIGALLOCATÉCHINE

### II.3.1.1. Les composés non flavonoïdes

Cette dénomination recouvre les stilbènes mais également les acides phénols, divisés en acides hydroxybenzoïques et acides hydroxycinnamiques (porteurs d'une chaîne latérale insaturée).

Les stilbènes sont des composés polyphénoliques contenant au minimum deux noyaux aromatiques. Les plus abondants dans le raisin sont le trans-resvératrol et son dérivé glycosylé, le picéide (Lamuela-Raventos et Waterhouse, 1994). La présence de resvératrol est observée particulièrement dans la pellicule, et les quantités présentes fluctuent en fonction de la qualité sanitaire du raisin. En effet, le trans-resvératrol possède des propriétés antifongiques et sa teneur augmente en présence du champignon pathogène *Botrytis cinerea* (Borie et al, 2004).

Dans le raisin, les acides phénols sont principalement des acides hydroxycinnamiques, qui se trouvent dans les vacuoles des cellules de la pellicule et de la pulpe, sous forme d'ester de l'acide tartrique (Ribéreau-Gayon, 1965). Ils sont principalement représentés par l'acide gallique, les esters galliques et les esters glucosides (Lu et al, 1999). Les acides phénols interviennent dans les phénomènes d'oxydation enzymatique, responsables du brunissement du jus de raisin, des moûts et des vins

### II.3.1.1. *Les composés flavonoïdes*

Ce groupe comprend plusieurs familles qui se différencient par le degré d'oxydation du noyau pyrane central. Chez le raisin, deux familles de composés sont principalement représentées, les anthocyanes et les flavan-3-ols, auxquels s'ajoutent les familles des proanthocyanidines et des flavanonols (ou dihydroflavonols).

Dans la baie de raisin, les flavonols, pigments de couleur jaune, sont présents uniquement dans les pellicules sous forme glycosylée. Ils ont un impact direct sur la couleur des vins, mais de façon moindre que les anthocyanes. Quatre flavonols glycosylés sont majoritairement présents dans le raisin : la kaempférine, la quercétine, la myricétine et l'isorhamnétine.

Les anthocyanes sont les pigments rouges responsables de la coloration des raisins rouges. Ils sont localisés dans les vacuoles des cellules de la pellicule, et plus exactement dans les trois ou quatre premières assises cellulaires de l'hypoderme (Amrani Joutei et al, 1994). Ces pigments sont également présents dans la pulpe des cépages teinturiers (cv. Alicante Bouschet).

Les proanthocyanidines ou tanins condensés sont présents dans les pépins et les pellicules de raisin. Le terme tanins fait référence à leur capacité à interagir avec les protéines. Les proanthocyanidines sont des oligomères ou polymères de flavanols. Ils jouent un rôle important dans les qualités organoleptiques des vins, notamment dans la sensation d'astringence et les phénomènes d'évolution de la couleur des vins, en s'associant aux anthocyanes pour former de nouveaux produits. La pellicule, les pépins et les rafles sont les parties les plus riches de cette famille de composés.

### II.3.2. **Méthodes d'évaluation de la maturité phénolique**

Les techniques utilisées pour l'étude quantitative des composés phénoliques au cours de la maturation diffèrent selon leur objectif et leur mode opératoire. La majorité d'entre elles est basée sur l'analyse du jus après extraction par divers solvants. Parmi elles la méthode de Glories (Glories et al, 1993) et la méthode de l'institut technique viticole (ITV) (Lamadon, 1995) sont les plus employées.

**La méthode de Glories** repose sur la différence d'extraction des composés phénoliques à pH=1 et à pH=3,2. Le milieu acide à pH 1 permet la dégradation des membranes cellulaires et l'extraction des anthocyanes alors que le milieu à pH 3,2 voisin de celui du raisin, fournit les composés facilement extractibles. On peut ainsi déterminer trois valeurs : le potentiel en anthocyanes du raisin, les anthocyanes extractibles et la maturité phénolique des pépins. La méthode est surtout adaptée pour définir les conditions de vinification en fonction des résultats. C'est une méthode longue car elle nécessite quatre heures de macération mais elle a l'avantage de prendre en compte les tanins des pépins et est comparable au milieu dans la cuve de vinification.

**La méthode ITV** s'utilise pour l'évaluation des teneurs en anthocyanes et composés phénoliques totaux. Elle est basée sur une micro-macération des baies en milieu hydro-alcoolique acide (éthanol 96% v/v et acide chlorhydrique 0,1% v/v) pendant une heure à température ambiante. Ce mélange favorise la désorganisation des parois cellulaires des baies induisant une extraction des composés phénoliques et des anthocyanes.

A la suite des extractions par ces différentes méthodes, la teneur en composés phénoliques totaux et en anthocyanes se fait par dosage spectrophotométrique à 280 nm et 520 nm, respectivement. Les méthodes d'analyses par chromatographie liquide à haute performance (C.L.P.H.) permettent quant à elles d'avoir une information quantitative et plus détaillée de la composition en polyphénols des raisins. Les résultats de la quantification et de l'identification des différents composés phénoliques permettent également de suivre l'évolution de chacune des classes de composés phénoliques au cours de la maturation. D'autres techniques telles que la spectroscopie proche infrarouge (Desseigne, 2008) ou la spectroscopie de fluorescence (LeMoigne, 2008) permettent d'évaluer la maturité phénolique des raisins.

L'ensemble des indicateurs de la maturité des raisins qui viennent d'être détaillés reposent sur des méthodes de mesure fiables et précises. Seulement pour la plupart d'entre elles, le coût et le temps d'analyse restent non négligeables. Ces méthodes sont basées sur l'analyse biochimique de composés caractéristiques de la période de maturation. Or cette période

fait également intervenir d'importantes modifications physiques et structurales de la baie. Ces évènements ont une influence directe sur la texture finale des baies pouvant être ainsi considérée comme un critère complémentaire dans l'évaluation de la qualité.

### **III. Un indicateur émergent : « La maturité texturale »**

#### **III.1. Définition de la texture des fruits**

La texture est définie par la perception sensorielle et fonctionnelle des propriétés structurales, mécaniques et de surface d'un aliment détecté par nos sens (Szczesniak, 2002). C'est une composante essentielle de l'appréciation d'un fruit par les consommateurs (Tunick, 2011). Par exemple, pour un fruit comme la pomme ou la tomate, la texture est l'un des principaux critères de qualité mentionné par les consommateurs (Causse et al, 2003 ; Serano-Megias et Lopez-Nicolas, 2006), de nombreux attributs sensoriels ont été identifiés comme la fermeté, l'élasticité ou la jutosité (Szczesniak, 2002). Une pomme ferme, croquante et juteuse est gage de fraîcheur et donc de qualité organoleptique et sanitaire. L'évaluation de la texture se fait généralement par l'intermédiaire d'attributs physiques ou sensoriels et les propriétés mécaniques observées à l'échelle macroscopique sont sous l'influence directe de paramètres physiques, physiologiques et structuraux, aux échelles des tissus, de la cellule et des molécules. Waldron et al (1997) ont associé les propriétés mécaniques à une hiérarchisation de différents niveaux de structure du fruit. A l'échelle microstructurale, la composition en polymères constitutifs de la paroi cellulaire, son épaisseur et le type d'osmolytes présents sont des éléments identifiés comme relevant de la texture du fruit. A une échelle supérieure, la structure (forme et organisation des cellules, nature des interactions cellule à cellule) et la proportion des tissus entrent également en compte dans la caractérisation de la texture (Ilker et Szczesniak, 1990).

Depuis longtemps la mesure des propriétés mécaniques est très utilisée pour déterminer la qualité et la date de récolte chez la pomme (Mehinagic et al, 2004). Pour le raisin, l'intérêt émergent de l'étude des propriétés mécaniques permet entre autres d'estimer le niveau de maturité des baies ou encore l'estimation de la sensibilité du raisin à certains pathogènes (ex : *Botrytis cinerea*). L'évolution de la texture démarre dès la construction du fruit (Chaib et al, 2007) mais la majorité des changements de texture ont lieu au cours de la phase de

maturation et l'évaluation de ces changements peut se faire par différentes approches : l'analyse sensorielle, la mesure instrumentale de la texture et l'analyse chimique de composés pariétaux. Dans la partie qui suit nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la synthèse des connaissances acquises sur l'analyse instrumentale de la texture des raisins.

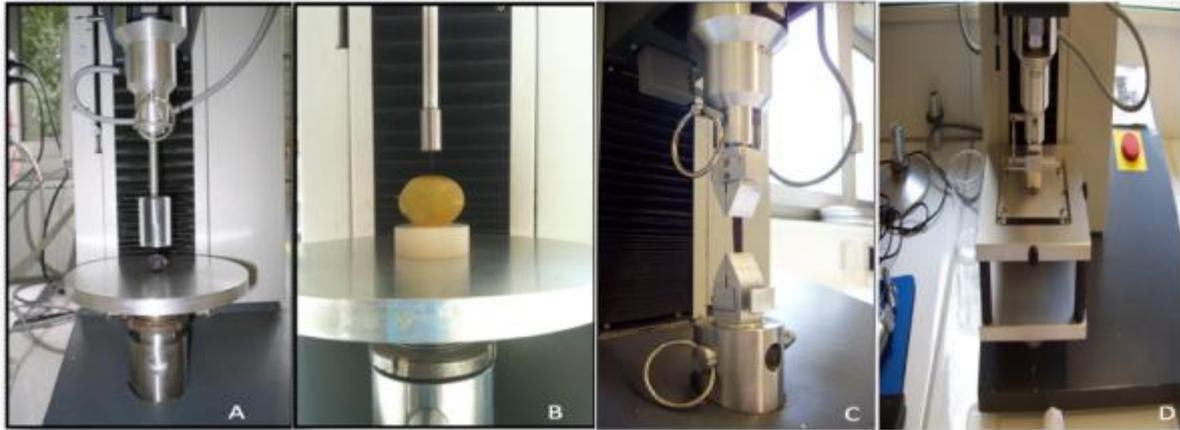
### III.2. Mesure instrumentale de la texture

La baie de raisin est assimilée à une sphère viscoélastique dont les propriétés mécaniques peuvent être décrites selon les théories de rhéologie classiques (Blahovec, 1994). Les principales grandeurs rhéologiques associées aux comportements mécaniques des baies de raisin ont dans ce contexte été évaluées par (Bourne, 2002) :

- **La contrainte** notée «  $\sigma$  » est une grandeur témoignant de la Force que l'on applique sur une surface donnée d'un échantillon et s'exprime en Pascal (N/mm<sup>2</sup>).
- **La déformation notée** «  $\epsilon$  » correspond au pourcentage de la hauteur déformée de l'échantillon après qu'il ait subi une contrainte.
- **Le module de Young E** est le rapport entre la contrainte et la déformation. Il correspond au module d'élasticité de l'échantillon et est représenté par la pente de la courbe contrainte/ déformation.

La mesure instrumentale de la texture des raisins consiste à mesurer différents paramètres relatifs aux propriétés rhéologiques des baies par l'intermédiaire de sondes et de capteurs afin d'en retranscrire numériquement les valeurs. Dans certains cas, la mesure instrumentale de la texture est préférée à l'analyse sensorielle car elle ne nécessite pas de jury entraîné et permet de réduire la variabilité liée à la perception et l'appréciation de l'aliment par chacun des juges (Rolle et al, 2012). Des travaux visant à développer une approche multicritères de la qualité des raisins, ont montré que beaucoup de paramètres instrumentaux de mesure de la texture sont corrélés avec des descripteurs d'analyse sensorielle décrivant les propriétés mécaniques des fruits (Abbott, 1999 ; Le Moigne, 2008). Les principales méthodes instrumentales pour caractériser les propriétés mécaniques des baies de raisins sont la compression, la pénétrométrie et la traction. La mesure instrumentale proprement dite est effectuée à l'aide d'une machine de traction universelle (UMT) appelée aussi texturomètre.

L'ensemble est constitué d'une colonne mécanisée, permettant de faire effectuer des mouvements verticaux ascendants ou descendants à des outils. L'échantillon est fixé à la base de la machine. La mesure de la texture s'effectue à l'aide d'un capteur de force placé sur l'outil comprenant une sonde géométrique adaptée à l'échantillon et au type de mesure désiré. Pour un test de compression des baies, cette sonde sera généralement de forme cylindrique (**Figure 7A**). Pour un test de pénétrométrie elle sera constituée d'un poinçon ou d'une aiguille aux extrémités arrondies ou plates et de diamètre variable (**Figure 7B**). Par exemple dans leurs travaux, Vargas et al (2001) ont utilisé une aiguille de 2mm de diamètre à extrémité plate ; Zouid et al (2010) ont utilisés une aiguille arrondie de 0,16mm de diamètre ou encore Rolle et al (2009a) ont utilisé une aiguille conique de 2mm de diamètre. Pour un test de traction sur pellicule, l'échantillon est fixé entre deux mors fixés d'une part, au capteur mobile supérieur et d'autre part, sur la partie fixe de la machine (Karathanos et al, 1994) (**Figure 7C**). Pour la traction sur pédicelle, la baie est maintenue par une plateforme trouée à travers laquelle le pédicelle traverse pour être relié à un mors (**Figure 7D**). Les conditions de l'analyse peuvent être contrôlées en modifiant la sensibilité du capteur de force qui peut aller de 0,5 à 50 kg ou en modifiant la vitesse de déplacement de la transverse exprimées en mm/s ou mm/min. Les mesures sont pilotées par ordinateur et retranscrites sous la forme de courbes Force/Temps, Force/Déformation ou Force/Distance. A titre d'exemple, Karathanos et al (1994) ont étudié la compression de baies de raisin à une vitesse de 100 mm/min les résultats étant issus de la courbe Contrainte (force par unité de surface)/Temps. Bellincontro et al (2009) ont étudié la courbe Force/Distance de la compression des baies à une vitesse de 25 mm/min.



**Figure 7. Photos des différents outils adaptés à la mesure de propriétés mécaniques du raisin. (A) Module de compression ; (B) Module de pénétration ; (C) Module de traction sur pellicule ; (D) Module de traction sur pédicelle.**

La mise en œuvre de l'analyse mécanique débute par une sélection de baie effectuée suivant un protocole de prélèvement et d'échantillonnage. Dans la littérature, celui décrit par Carbonneau et al (1991) est très largement utilisé dans la plupart des études de texture. Il permet d'avoir un échantillonnage représentatif de la parcelle (échantillonnage globale) bien que par cette approche il soit difficile de maîtriser la variabilité des lots. D'autres études proposent de calibrer en plus les échantillons de baies prélevées en fonction de leur densité estimée par flottaison dans des bains de chlorure de sodium (Rolle et al, 2010 ; Torchio et al, 2010). Dans la littérature, le nombre de baies par lot est très variable allant de 5 baies analysées (Sato et al, 2004) à 50 baies (Le Moigne et al, 2008). Ce paramètre est important car un trop grand nombre d'échantillons augmente considérablement la durée de l'analyse, mais à l'inverse un nombre d'échantillon trop faible ne garantit pas la significativité des résultats ni la représentativité du lot par rapport à la population globale. Dans leur travaux, Maury et al (2009) ont calculés les coefficients de variation (CV) des paramètres de texture de double compression 20% pour estimer l'hétérogénéité des lots et le nombre de baies par lot nécessaires pour réaliser cette mesure de texture. Dans cette étude, le nombre minimal de baies par lots correspond au moment où la courbe du CV en fonction du nombre de baie atteint un plateau. Les résultats ont montré que la courbe devenait stable et que le CV n'évoluait plus quand au moins 20 baies étaient analysées.

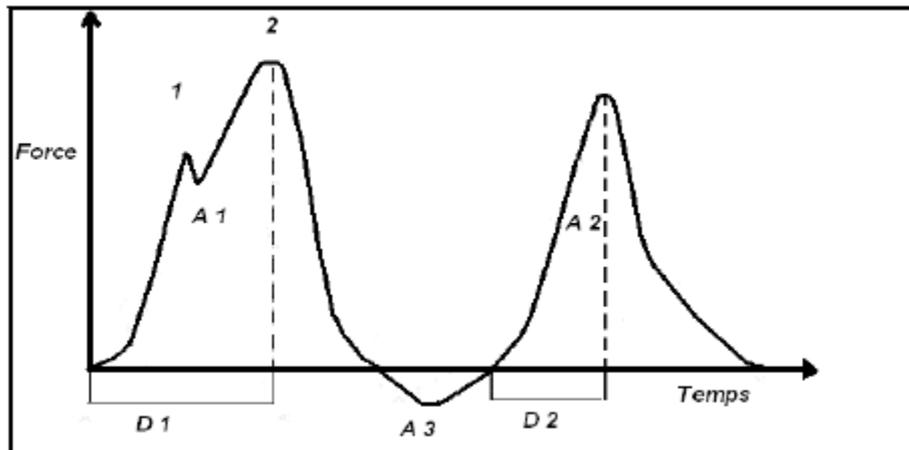
En plus de la taille de l'échantillon, il est nécessaire de définir les conditions liées à la mesure de texture. Dans un premier temps il est recommandé d'effectuer les analyses le plus rapidement possible après le prélèvement des échantillons à la parcelle avec une limite de 48 h. Au-delà de ce temps les propriétés mécaniques résultantes peuvent avoir été modifiées par les conditions et les températures de stockage. Rolle et al (2009a) recommandent de réaliser les analyses à température ambiante ( $20 \pm 2$  °C).

A présent nous allons décrire les principales méthodes de mesure instrumentale de la texture chez le raisin que sont la compression destructive ou non destructive, la pénétrométrie et la traction.

### **III.2.1. Les méthodes de compression destructive et non destructive**

La compression est une technique fréquemment utilisée dans la mesure des propriétés mécaniques des baies. Elle tient à la fois compte de l'impact de la pellicule et de la pulpe. Elle permet de retranscrire un geste habituellement fait en analyse sensorielle en estimant la fermeté ou l'élasticité des baies en exerçant une pression entre les doigts. Dans ce cas, la machine exerce un ou plusieurs cycles de pression/relaxation sur la baie à différents niveaux de déformation rendant la mesure invasive ou non invasive. Un cycle de compression nécessite dans un premier temps une tare de la machine qui lui permet de connaître la distance entre le support et le capteur et donc précisément la taille de l'échantillon afin d'y appliqué le taux de déformation souhaité. La sonde cylindrique de compression descend lentement et à vitesse constante jusqu'à son premier contact avec la baie placée en position équatoriale (le pédicelle est parallèle à la plateforme de maintien). Après avoir comprimé la baie au taux de déformation souhaité, la sonde remonte induisant une phase de relaxation de l'échantillon. Friedman et al (1963) ont mis au point un test non destructif qui consiste à comprimer deux fois successivement la baie. Ce test est connu sous le nom de Texture Profile Analysis (TPA) (Letaief et al, 2008a) ou encore test de double compression (Maury et al, 2009). Les deux cycles de compression peuvent être séparés ou non par un temps d'attente (**Figure 8**). Le taux de déformation varie d'une étude à l'autre (ex : 10% pour Robin et al, 1997 et 20% pour Maury et al, 2009). Cependant un taux de déformation trop élevé induira une déchirure de la pellicule rendant le deuxième cycle de compression impossible.

La limite de déformation non invasive dépend en grande partie de la variété étudiée et de l'état sanitaire et de maturité de l'échantillon.



**Figure 8. Courbe Force/Temps d'un profil TPA (Double compression). D'après Roudot et al (2002).**

Les paramètres obtenus après une TPA sont issus de l'analyse des courbes acquises durant le test. Les mêmes paramètres sont souvent notés différemment suivant les auteurs. On retrouve notamment la force en (N) nommée aussi dureté ou fermeté qui est la force maximale atteinte lors du premier cycle de compression et au deuxième cycle de compression. Cette force peut être nommée F1 et F2 (Maury et al, 2009 ; Zouid et al, 2010) ou BH signifiant « Berry Hardness » (Letaief et al, 2008a ; Rolle et al, 2011c ; Rio Segade et al, 2011a). Le module d'élasticité de Young est nommé E (Letaief et al, 2008a ; Rolle et al, 2009a ; Torchio et al, 2010), Grad 1 et Grad2 (Le Moigne, 2008 ; Zouid et al, 2010) ou encore SF1 et SF2 (Maury et al, 2009). On retrouve également des paramètres secondaires tels que les paramètres cohésion (Adimensionnel) et gommeux (N) qui sont respectivement le rapport entre W2 et W1 (« W » correspondant à l'énergie de nécessaire aux cycles de compression), et le produit entre force à la première compression et la cohésion. Afin de s'affranchir de la taille de la baie, Le Moigne et al (2008) ont exprimé les résultats en pression (Pa) plutôt qu'en force (N) bien que Maury et al (2009) aient par la suite démontré qu'il n'y avait pas de différences dans l'expression de ces deux résultats.

### III.2.2. La méthode de pénétrométrie

La pénétrométrie est une mesure instrumentale qui tient compte des propriétés mécaniques de la pellicule ou de la pulpe séparément, l'impact de la pulpe étant minimisé (Rolle et al, 2009b). Elle consiste à faire pénétrer à une vitesse et une profondeur donnée une sonde (aiguille ou poinçon) de diamètre et de forme variable. En général une ponction de 2 mm est suffisante pour perforer la pellicule d'un raisin. La vitesse de pénétration est variable d'une étude à l'autre, allant de 8 mm/min (Zouid et al, 2010) à 10 mm/s (Walker et al, 2001).

Les paramètres calculés peuvent porter des noms différents selon les études :

- La force en N ( $F_{sk}$ ,  $H_{pen}$  ou  $F_{max}$ ) qui est la force maximale nécessaire à perforer la pellicule de raisin ;
- La distance en mm parcourue par la sonde avant perforation ( $D$ ,  $AL_{max}$ ) ;
- L'énergie pour rompre la pellicule en mJ ( $W_{max}$ ,  $W_{pen}$ ) correspondant à l'aire sous la courbe entre le début de la mesure et le point de rupture ;
- Le module de Young de la pellicule qui correspond à la pente associée à la courbe ascendante de pénétration (N/mm) ( $Grad$ ,  $E_{sk}$ ,  $S_{pen}$ ).

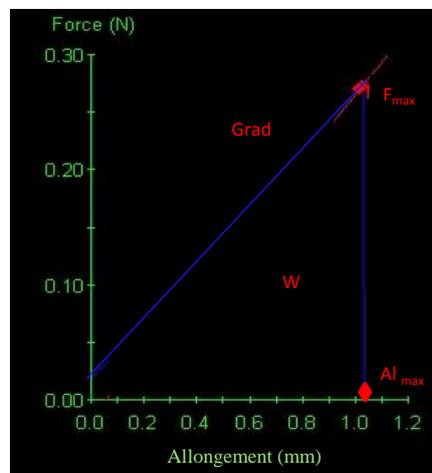


Figure 9. Exemple de courbe Force/déplacement issue de la mesure de pénétrométrie sur raisin.

### III.2.3. Les méthodes de traction

Pour le raisin on distingue deux types de méthodes de traction : la traction sur pédicelle et la traction sur pellicule. La première, à l'instar des méthodes de compression, vise à reproduire au laboratoire un geste d'estimation de la maturité effectué par les viticulteurs à la parcelle

ou lors de tests d'analyses sensorielle, en estimant la résistance au détachement du pédicelle du reste de la baie. Ainsi un pédicelle qui se détache facilement de la baie indique usuellement une date optimale de vendange proche. La traction sur pellicule est une technique qui vise à étudier la résistance à l'étirement des couches externes de la baie de raisin. Dans la littérature, ces deux tests sont peu utilisés par rapports aux autres mesures instrumentales de la texture chez le raisin. Dans leurs travaux Rolle et al (2009a) ont étudié la résistance au détachement de pédicelle de raisins de variété Mondeuse au cours de processus de séchage de raisins en surmaturation. Le texturomètre utilisé possédait une plateforme percée d'un trou de 5 mm de diamètre pour laisser passer le pédicelle. L'analyse effectuée à une vitesse de 1 mm/s permet d'extraire les paramètres  $F_{ped}$  (N) et  $W_{ped}$  (mJ) qui sont respectivement la force et l'énergie nécessaire au détachement complet du pédicelle du reste de la baie. Les résultats de cette étude ont montré qu'au cours du séchage les valeurs de  $F_{ped}$  et  $W_{ped}$  diminuaient significativement. De même Deng et al (2005) ont étudié la résistance au détachement de pédicelle de raisins de table de la variété Kyoho au cours du stockage après récolte. Ils ont observé une diminution du paramètre FDF (Fruit Detach Force) qui correspond à la force maximale de détachement du pédicelle.

La technique de traction sur pellicule est une méthode qui a déjà été employé pour d'autres fruits comme la tomate (Matas et al, 2004), la cerise (Bargel et al, 2004) ou encore la pomme (Tu et al, 1996). Chez le raisin à notre connaissance seuls Karathanos et al (1994) se sont intéressés à cette technique dont les principales contraintes non négligeables sont la préparation et le calibrage des échantillons de pellicule que l'on ne retrouve pas dans les autres mesures instrumentales de la texture.

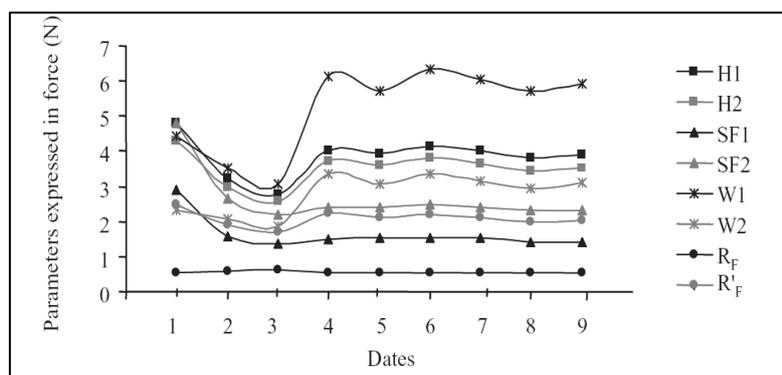
### **III.3. Etude des propriétés mécaniques des raisins au cours de la maturation**

L'étude instrumentale de la texture des raisins de cuves et de tables a été initiée par les travaux de Lee et Bourne (1980). A l'origine l'objectif était de différencier par ces méthodes, des variétés différentes de raisin ou de caractériser avec précision les changements de texture intervenant au moment de la véraison, notamment sur raisin blanc. Les auteurs ont utilisé des tests de pénétrométrie à 200 mm/min sur six variétés de raisins. Les résultats de cette étude ont montré que la force de perforation de la pellicule diminue rapidement à la

véraison puis continue à baisser plus lentement au cours de la maturation. La déformabilité augmente de façon constante tout au long de la période de maturation et les paramètres de pénétrométrie montraient une forte corrélation les uns avec les autres.

Le Moigne et al (2008) ont montré l'avantage de développer une approche multicritères en combinant une approche instrumentale (double compression 20%) et sensorielle de la texture sur des raisins de variétés Cabernet Franc. Dans cette étude les résultats de double compression ont permis de discriminer des millésimes et des parcelles différentes mais n'ont pas permis d'effectuer un suivi de maturité des raisins au cours de la maturation, bien qu'un ramollissement ait été observé au moment de la véraison.

De même dans leurs travaux Maury et al (2009) ont mis en évidence par des tests de double compression 20% des changements de texture des baies de Cabernet Franc autour de la véraison, mais les paramètres restaient constants au cours de la maturation (**Figure 10**). Les auteurs ont avancé que les conditions de pluviométries importantes au cours de la période de récolte pouvaient expliquer ce résultat, les baies ayant maintenu une turgescence élevée après l'absorption de l'eau.



**Figure 10. Evolution des paramètres de double compression 20% au cours de la maturation de Cabernet Franc (d'après Maury et al 2009).**

Torchio et al (2009) ont effectué des tests de pénétrométrie sur pellicule de baies de variété Barbera récoltées à la même date dans différentes parcelles et calibrées selon leur densité. Le paramètre  $Sp_{sk}$  correspondant à l'épaisseur de la pellicule était influencé par la densité alors que le paramètre lié à la force de rupture de la pellicule,  $F_{sk}$ , était plus influencé par la parcelle.

Il existerait une relation entre l'évolution des propriétés mécaniques au cours de la maturation et l'extractibilité des composés phénoliques. Ainsi dans leurs travaux Zouid et al (2011) ont montré que pour trois dates différentes en fin de maturation, l'extractibilité des anthocyanes est fortement corrélée aux paramètres de pénétrométrie sur pellicule de raisin liés à la force, l'énergie et le module de Young (Fsk, Wsk et Esk). Des résultats similaires ont été présentés dans les études de Rio Segade et al (2008) ; Rolle et al (2009b et 2012b) ou des régressions linéaires statistiquement significatives entre le paramètre mesurant la force à la rupture de la pellicule et l'indice d'extractibilité des anthocyanes à la récolte pour des variétés de raisin de cuve ont été montrées.

Dans un but de mieux comprendre l'évolution de la texture des baies, la partie suivante s'intéresse aux facteurs physiologiques et biochimiques majeurs influençant le ramollissement de la baie de raisin.

## **IV. Facteurs influençant le ramollissement de la baie de raisin**

Deux processus ont été identifiés comme ayant un rôle majeur dans le ramollissement du fruit. Tout d'abord, la baisse de la fermeté du fruit coïncide avec des changements de structure et de composition de la paroi cellulaire et de sa lamelle moyenne (Hiroyuki et al, 1979 ; Silacci et Morrison, 1990 ; Amrani-Joutei et Glories, 1994 ; Chardonnet et al, 1994 ; Nuan et al, 1998 ; Yakushiji et al, 2001 ; Vicens, 2009). En effet, durant la maturation de la baie de raisin, les polysaccharides constituant la paroi sont réorganisés, désassemblés et dégradés en relation avec une augmentation en activité de différentes enzymes spécifiques de la maturation. Les conséquences de cette dégradation entraînent la réduction de la cohésion entre les cellules, la dépolymérisation et solubilisation des hémicelluloses et des polysaccharides pectiques des parois cellulaires, et parfois un gonflement de la paroi (Brummel et Harpster, 2001). Le second processus physiologique impliqué dans le ramollissement de la baie est la chute de la pression de turgescence au cours de la maturation qui témoigne du rôle prépondérant de l'eau dans les modifications des propriétés mécaniques de la baie.

## IV.1. Rôle de la paroi cellulaire

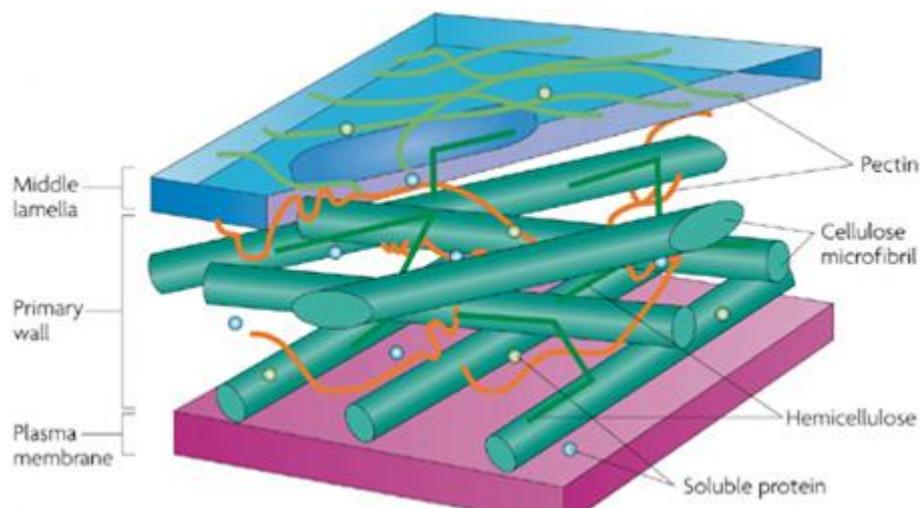
### IV.1.1. Structure générale des parois cellulaires

Trois zones peuvent être distinguées dans la paroi cellulaire des végétaux :

-La lamelle moyenne à l'interface entre les parois cellulaires proprement dite, est principalement composée de pectines. Elle assure la cohésion entre les cellules mitoyennes.

-La paroi primaire (1-3  $\mu\text{m}$ ) est plus épaisse que la lamelle moyenne et est formée juste après la division cellulaire. Elle comprend trois réseaux interconnectés (**Figure 11**): un réseau cellulose-hémicelluloses (8-25%) dans lequel est intégrée une matrice pectique (10-35%). Le dernier réseau correspond à des protéines pariétales (10%) (Carpita et Gibeaut, 1993).

-La paroi secondaire, bien plus épaisse que la paroi primaire, est largement constituée de microfibrilles de cellulose. Celles-ci sont organisées en couches de faisceaux parallèles d'orientation distincte par couche (40-80%). Cette zone pariétale contient également des hémicelluloses (10-40%), des pectines et plus ou moins de lignine (5-25%) (Bidlack et al, 1992). Elle est particulièrement présente dans les tissus de soutien (collenchyme, sclérenchyme) donnant naissance à des structures de type bois, riche en cellulose et lignifiées. La baie de raisin se caractérise par des parois cellulaires souples, hydrophiles et peu lignifiées s'apparentant à la paroi primaire.

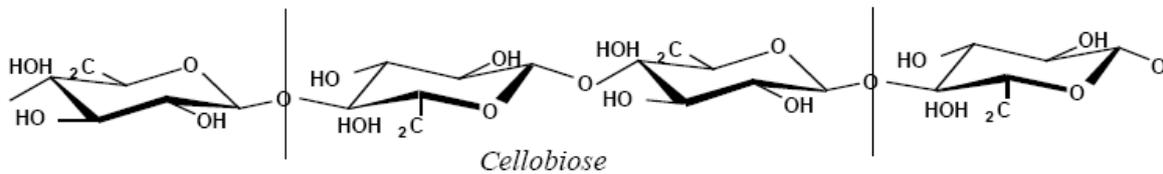


**Figure 11.** Représentation schématique de l'organisation de la paroi primaire chez les dicotylédones (d'après Nature Publishing Group 2008).

## IV.1.2. Structures des parois cellulaires de la baie de raisin

### IV.1.2.1. Le réseau cellulose-hémicellulose:

La cellulose est composée de chaînes de  $\beta$ -D-glucopyranoses liés en (1 $\rightarrow$ 4). Le cellobiose, qui correspond à deux  $\beta$ -D-glucopyranoses liés en (1 $\rightarrow$ 4), constitue l'unité de répétition de la cellulose (**Figure 12**). Les chaînes de glucanes s'assemblent par des liaisons de type hydrogène ou de Van der Waals, pour former les microfibrilles de cellulose.



**Figure 12. Séquence primaire et modèle structural de la cellulose.**

Dans la paroi cellulaire de la pellicule, les hémicelluloses sont principalement représentées par les xyloglucanes, constitués d'une chaîne principale de  $\beta$ -D-glucopyranoses liés en (1 $\rightarrow$ 4) qualitativement identique à la cellulose, mais environ 75% des résidus glucose portent des résidus  $\alpha$ -D-xylose liés en (1 $\rightarrow$ 6), et approximativement 35% d'entre eux sont substitués avec des résidus galactose. D'autres sucres neutres comme les mannanes (chaîne principale formée de mannose-glucose avec des unités de galactose ramifiées), xylanes (chaîne principale de xylose avec des unités d'arabinose ramifiées), et arabino-galactanes (chaînes d'arabinose et de galactane) ont été détectés en quantités minimales dans les parois cellulaires de la pellicule de raisin (Lecas & Brillouet, 1994 ; Pinelo et al, 2006).

### IV.1.2.1. Les polysaccharides pectiques.

Les polysaccharides pectiques principaux retrouvés dans le raisin sont :

Les homogalacturonanes (HG), constitués d'une chaîne d'acides  $\alpha$ -D-galacturoniques liés en (1 $\rightarrow$ 4) pouvant être substitués par du xylose.

Le rhamnogalacturonane I (RGI), composé d'un squelette  $\alpha$ -L-rhamnose liés en (1 $\rightarrow$ 2) en alternance avec de l'acide  $\alpha$ -D-galacturonique lié en (1 $\rightarrow$ 4), et ramifié principalement avec des chaînes d'arabinanes et de galactanes.

Le rhamnogalacturonane II (RGII), constitué d'un squelette homogalacturonique ramifié par 4 différentes chaînes latérales complexes.

#### **IV.1.2.1. *Les protéines pariétales***

Que ce soit dans la pellicule ou dans la pulpe, les protéines pariétales représentent 5 à 10% du matériel pariétal (Nunan et al, 1997). Ces protéines sont classées en trois groupes suivant leur composition : les protéines riches en proline, riches en glycines, et riches en hydroxyproline. Nunan et al (1997) ont noté la présence de protéines riches en hydroxyproline, acide aminé caractéristique des protéines de la famille des extensines. Cet acide aminé peut représenter jusqu'à 14% des acides aminés des protéines associées aux parois (pourcentage molaire). Les acides aminés soufrés, méthionine et cystéine, sont présents en quantité faible, voire nulle (Huang et al, 2005). Les protéines riches en hydroxyproline forment un réseau de fibres dans les parois cellulaires des plantes qui serait indépendant du réseau cellulosique. Ce réseau de protéines riches en hydroxyproline renforcerait les parois cellulaires (Carpita et Gibeaut, 1993).

### **IV.1.3. Evolution de la paroi cellulaire au cours de la maturation de la baie**

#### **IV.1.3.1. *Interactions et modulations enzymatique des constituants pariétaux***

Huang et al (2005) ont montré que la solidité et l'élasticité de la paroi diminuent fortement après la véraison et lors de la maturation, alors que l'extensibilité de la pellicule augmente au cours de la maturation, suggérant une dégradation continue des parois cellulaires de la pellicule après la véraison. Le relâchement des parois est causé entre autres par la diminution des interactions hydrogène et ionique entre les différents réseaux pariétaux. Ce processus est initié par une acidification de la paroi résultant de l'activation des pompes à protons présentes sur la membrane plasmique par l'action de l'hormone de croissance, l'auxine. L'efflux de proton  $H^+$  vers la paroi acidifie le pH (pH 4,5-5) qui stimule ensuite la plasticité en favorisant notamment l'action d'enzymes et de protéines comme l'expansine. Cette dernière s'intercalent entre les fibres de cellulose et l'hémicellulose et rompent les liens qui les unissaient (Cleland, 1971). En effet les xyloglucanes, forme principale de l'hémicellulose, se lient à la surface des fibres de cellulose par l'intermédiaire de liaisons

hydrogènes permettant ainsi de connecter les fibres de celluloses entre elles tout en limitant leur agrégation. Hémicelluloses et celluloses peuvent aussi être clivées de façon irréversible par l'action d'enzymes, les endo- $\beta$ -1,4- D-glucanases ou temporairement par les endoxyloglucanes transférases/hydrolases (XTH) (Fry et al, 1992).

Les pectines sont hydrolysées par des pectinases telles que les polygalacturonases (PG), pectine lyase,  $\beta$ -galactosidase,  $\alpha$ -galactosidase,  $\alpha$ -arabinofuranosidase et pectine méthylestérase (PME) (Huber, 1983). La PME hydrolyse le groupement méthylester présent en C6 des acides galacturoniques composant les pectines, ce qui va libérer un groupement carboxyle pouvant par la suite interagir avec les ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$  et créer un gel pectique qui rigidifie la structure. L'action de la PME rend plus accessible les sites de fixation de la PG a son substrat et contribue à l'augmentation de la solubilité des composés de la paroi cellulaire ainsi que son relâchement.

#### IV.1.3.1. *Evolution des polysaccharides et des protéines pariétales*

La teneur en polysaccharides dans les parois des cellules de la pellicule reste constante au cours de la maturation de la baie de raisin, et lors de la sur-maturation (4 mg/baie) (Vicens et al, 2009). Au cours des trois semaines suivants la véraison, Vicens et al (2009) montrent une perte importante de galactose dans la pellicule. Vicens et al (2009) suggèrent que la majeure partie des polysaccharides présents dans les vins dérivent du mésocarpe et non de la pellicule. Cette dernière jouant un rôle de protection, résistante envers la solubilisation et elle conserverait son rôle de maintien de l'intégrité des baies lors de la vinification. De plus, dans sa thèse Vicens (2007) a montré que la dégradation modérée des polysaccharides des parois pelliculaires n'avait pas d'impact réel sur l'extractibilité des composés phénoliques.

La composition des protéines pariétales de la pellicule reste stable au cours du développement de la baie, mais une forte augmentation en hydroxyproline a été observée en fin de maturation. Le taux d'hydroxyproline augmente significativement au cours de la maturation de la baie dans la pellicule et particulièrement lorsque la baie atteint sa taille finale (Huang et al, 2005). D'après Vicens et al (2009), le niveau de protéines associées aux parois cellulaires dans la pellicule de la baie de raisin augmenterait jusqu'à 7 semaines après la véraison, mais diminuerait ensuite. Tous les acides aminés augmentent au cours de cette

période de maturation mais la plus importante évolution concerne l'hydroxyproline, la proline, la lysine, la tyrosine et l'histidine. Dans le mésocarpe le taux d'hydroxyproline triple (Nunan et al, 1998). Les extensines seraient synthétisées et incorporées aux parois cellulaires après la véraison. Les protéines structurales riches en hydroxyproline comme les extensines, seraient déposées au niveau des parois cellulaires des baies en développement, aussi bien dans la pellicule que dans le mésocarpe (Nunan et al, 1998 ; Huang et al, 2005). Il semblerait que l'expansion des cellules du mésocarpe au cours de la maturation de la baie nécessiterait un renforcement des parois par des protéines riches en hydroxyproline, ce qui maintiendrait l'intégrité cellulaire durant le processus de ramollissement de la baie (Nunan et al, 1998). Cette incorporation de protéines structurales au cours de la maturation de la baie peut également être corrélée à la perte partielle des polysaccharides des parois cellulaires dans la pellicule (Huang et al, 2005).

## **IV.2. Rôle de l'eau**

### **IV.2.1. Xylème et phloème**

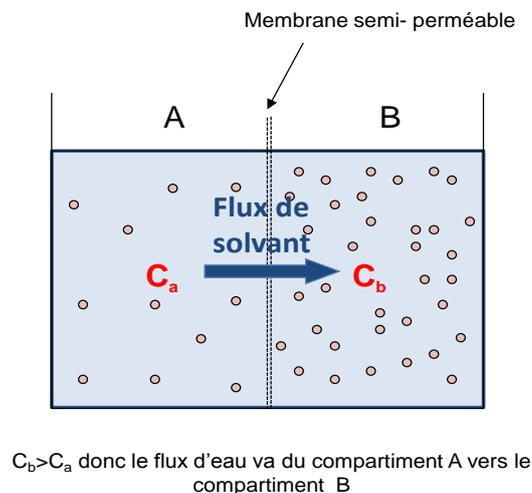
Au cours de son développement, la baie est alimentée en eau et en solutés par le xylème et le phloème qui sont tous deux des tissus conducteurs de sève. Le xylème est chargé du transport de la sève brute issue de l'absorption de fluides par les racines, et le phloème est chargé du transport de la sève élaborée pour l'acheminement des produits issus de la photosynthèse. Cet apport en eau au cours de la phase de maturation contribue au grossissement des baies par élongation des cellules après l'arrêt des divisions cellulaires. Après la véraison, une augmentation du flux phloémien est corrélée avec une diminution significative du flux xylémien dans la baie de raisin. La baisse du flux xylémien a d'abord été attribuée à une dégradation physique des vaisseaux pendant la maturation. Mais Bondada et al (2005) ont montré que cette diminution serait due à une réduction du gradient hydrostatique entre le xylème dans le pédicelle et le xylème dans la baie, et non à un dysfonctionnement physique du xylème. Chatelet et al (2008b) montrent également que le xylème des baies en phase de maturation, conserve son intégrité structurale. Ils observent que : 1) les vaisseaux sont capables de s'étirer jusqu'à 20%, 2) les éléments des trachéides se différencient continuellement et des nouveaux faisceaux vasculaires s'ajoutent au réseau vasculaire même après arrêt de la croissance de la baie, 3) le diamètre vasculaire

augmente de près de 40% et l'augmentation de ce diamètre suit une double sigmoïde comparable à celle représentant la croissance d'une baie de raisin et 4) la distance entre le réseau vasculaire et l'épiderme augmente avant et après la véraison.

#### IV.2.2. Pression osmotique et turgescence

L'osmose est par définition la diffusion de l'eau qui tend à équilibrer les concentrations moléculaires entre deux compartiments. L'eau présente dans une solution de faible concentration de soluté va traverser une membrane semi-perméable vers une solution de concentration plus élevée : ce phénomène est appelé flux osmotique.

La pression osmotique est définie comme la pression minimale qu'il faudrait exercer pour empêcher le flux net d'eau à travers une membrane séparant deux solutions de concentrations différentes. La pression osmotique est directement proportionnelle à la différence de concentration des molécules de soluté de part et d'autre de la membrane (**Figure 13**). D'après l'équation de Van't Hoff la pression osmotique est :  $\pi = RT (C_b - C_a)$  (où R : constante des gaz parfaits =  $8,3144621 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).



**Figure 13. Schéma du flux osmotique entre deux solutions de concentrations différentes séparées par une membrane semi perméable.  $C_a$  : concentration dans le compartiment A et  $C_b$  : concentration dans le compartiment B.**

Dans les cellules végétales, la concentration des solutés comme les sucres ou les sels est généralement supérieure dans la vacuole à celle dans le cytosol. Si le milieu extracellulaire est moins concentré que la vacuole de la cellule, l'eau a tendance à entrer dans la cellule. La

cellule gonfle et exerce une pression sur la paroi (pression de turgescence). Si la paroi n'est pas plastique, l'entrée d'eau s'arrête lorsque la contre pression exercée par la paroi est égal à la pression de turgescence. Si la paroi est plastique, elle se déforme sous l'effet de la pression de turgescence et la cellule grandit. La pression de turgescence est donc due à la pression mécanique exercée par l'eau de la vacuole sur la couche cytoplasmique et la paroi. La pression de turgescence, phénomène clé des relations plante-eau, est impliquée dans le développement et l'accumulation de sucres dans le fruit. Elle est depuis longtemps reconnue comme étant un aspect fondamental des propriétés mécaniques des tissus (Bruce, 2003).

Une pression de turgescence réduite des cellules du mésocarpe, causée par la perte de viabilité des cellules, est proposée comme mécanisme principal pouvant augmenter le flux phloémien au cours du mûrissement des fruits (Lang and During, 1991). Cependant, Thomas et al (2006) ont montré que les cellules du mésocarpe présentent des propriétés osmotiques et hydrauliques typiques des cellules ayant des membranes fonctionnelles (semi-perméables), donc la diminution de viabilité des cellules (Krasnow et al, 2008) ou d'intégrité de la membrane cellulaire n'est pas due à une pression de turgescence réduite.

#### *Pression de turgescence et ramollissement de la baie :*

Chez le raisin, Matthews et Shackel (2005) ont montré sur des baies de variété Cabernet Sauvignon que la pression de turgescence de cellules du mésocarpe diminuait à la véraison et qu'ainsi le ramollissement des baies pouvait être causé par une accumulation de soluté dans la paroi associé à une baisse de la pression de turgescence. Thomas et al (2008) ont démontré chez trois variétés de raisin, Chardonnay, Pinot Noir et Cabernet Sauvignon, que la pression de turgescence des cellules du mésocarpe décrit un modèle commun dans lequel la pression de turgescence augmente significativement lors de la phase 1 du développement de la baie ( $> 0,3$  MPa), et diminue au cours de la phase 2 pour atteindre des valeurs assez faibles ( $< 0,05$  MPa), qui restent stables pendant la maturation. Ainsi les auteurs suggèrent que la faible pression de turgescence pourrait agir comme un signal pour la mise en place de la phase de maturation. De même, Wada et al (2008) complètent les résultats des études précédentes en montrant que la pression de turgescence est fortement réduite par la présence de solutés apoplastiques, suggérant que le ramollissement des baies de raisin (cv. Cabernet Sauvignon), et peut-être d'autres fruits, serait une conséquence physique directe

de la diminution de la pression de turgescence, plutôt que des changements structuraux des parois cellulaires. Ils ont montré entre autres que la faible pression de turgescence observée après la véraison est associée avec une importante augmentation des concentrations en fructose et en glucose dans l'apoplaste (Thomas et al 2008 ; Wada et al 2008).

Des études post-récolte chez la tomate (Shackel et al, 1991), le concombre (Sajnin et al, 2003) et la pomme (Tong et al, 1999) montrent que lorsque la pression de turgescence des cellules diminue, une perte de fermeté des tissus est observée. De plus, la pression de turgescence joue un rôle principal dans les propriétés rhéologiques de la pomme de terre et de la carotte (Ohnishi et al, 2003 ; Greve et al, 1994).

Le même modèle est observé pour l'élasticité des baies de raisin. Le lien étroit entre élasticité de la baie et pression de turgescence des cellules argumenterait pour dire que la pression de turgescence est l'un des facteurs principaux pour déterminer la fermeté des baies. L'élasticité de la baie et sa déformabilité sont inversement liées. L'élasticité diminue précocement au cours du développement du fruit, bien avant l'arrivée à la véraison. Les éléments structuraux de la paroi cellulaire, comme les microfibrilles de cellulose, supportent la tension imposée par la pression de turgescence de la cellule et il apparaît que les modifications des parois cellulaires pourraient influencer de manière indépendante la pression de turgescence et la rigidité structurale des tissus (Thomas et al, 2008).

## **V. Facteurs d'hétérogénéité de la vendange et échantillonnage**

### **V.1. Les facteurs d'hétérogénéité de la vendange**

En viticulture les parcelles sont soumises à l'action d'un ensemble de facteurs environnementaux d'origines naturelles ou liés à l'intervention humaine. L'influence de ces facteurs sur la physiologie de la vigne induit une variabilité telle que chaque baie, de chaque grappe, de chaque cep se développe à des vitesses et des degrés différents.

Mieux comprendre les conséquences de l'hétérogénéité permet de tendre vers des outils d'aide à l'évaluation des parcelles et d'introduire la notion de viticulture de précision.

L'évaluation de l'hétérogénéité permet également de mieux anticiper la date des vendanges et d'orienter le choix de processus de vinification adaptés.

Les facteurs d'hétérogénéité sont spécifiques d'une échelle géographique relevant soit du microclimat, du mésoclimat ou du macroclimat (**Figure 14**).



**Figure 14. Différentes échelles de climat en viticulture.**

A l'échelle régionale, les principaux facteurs d'hétérogénéité sont liés aux caractéristiques climatiques de la région viticole (macroclimat). En France il existe 3 grands types de climats adaptés à la culture de la vigne:

- le climat océanique doux et humide. Les écarts de température entre hiver et été sont faibles ;
- le climat continental caractérisé par des étés chauds et des hivers froids ;
- Le climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux.

Les vignobles du Val de Loire sont partagés entre un climat tempéré océanique en Anjou et un climat à dominance continentale du Saumurois jusqu'à la Touraine, les flux océaniques étant progressivement arrêtés par le relief des collines.

A l'échelle locale les différences majeures de la parcelle au terroir, sont essentiellement liées au type de sol et à des facteurs relevant du mésoclimat tels que l'altitude, le relief, l'exposition, les forêts, les masses d'eau.

A l'échelle du cep, le principal facteur est la situation des grappes sur les rameaux qui ont des vigueur individuelles et des conditions microclimatiques différentes. A l'échelle de la grappe, les principaux facteurs d'hétérogénéité sont la luminosité et la température entre les faces exposées et ombragées relevant du microclimat. (Asselin et al, 2001).

Cette partie s'intéresse à l'hétérogénéité à l'échelle de la parcelle, à l'échelle du cep et à l'échelle de la grappe et les facteurs qui leurs sont associés.

### **V.1.1. L'hétérogénéité à l'échelle de la parcelle**

La qualité d'une vendange dépend des conditions de développement et de fonctionnement de la vigne qui sont sous l'influence de son milieu (effet terroir) et des conditions climatiques (effet millésime).

#### **V.1.1.1. Le terroir**

Le terroir est par définition «un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir collectif des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet espace » (Résolution OIV/Viti 333/2010). A l'INRA d'Angers a été développée en 2008 par l'équipe de Gérard Barbeau la notion d'unité de terroir de base (UTB), pour caractériser les terroirs viticoles. Des unités spatiales homogènes ont ainsi été cartographiées selon les composantes géologiques, agro pédologiques et paysagères du milieu. D'après Barbeau (2008) l'effet terroir sur la qualité de la vigne agit sur les variables associées au potentiel de précocité, l'alimentation hydrique et le potentiel de vigueur.

Le potentiel de précocité du cycle de la vigne correspond à l'avancée des stades phénologiques de la vigne (du débourrement à la maturité). La précocité du cycle de la vigne joue un rôle important dans la composition finale des raisins en éléments de la maturité technologique, phénolique et aromatique. En général les parcelles précoces présentent une vendange plus sucrée et moins acide avec un meilleur état sanitaire (Morlat, 2001 ; Pasquini, 2002 ; Barbeau, 2008).

La variable liée à l'alimentation hydrique joue un rôle important dans le développement de la vigne et la composition finale du raisin. L'excès d'eau favorise la vigueur des rameaux et le rendement. Cela se traduit aussi par un retard et allongement du cycle et une dilution de métabolites. Par conséquent, la maturation est plus tardive, les raisins sont plus gros, moins concentrés en sucre et contiennent moins de composés phénoliques (Kennedy et al, 2000; Jackson, 2008 ; Neethling, 2010).

S'il y a un stress hydrique important, les conséquences sur le fonctionnement de la vigne sont une baisse de la photosynthèse ainsi qu'une baisse du rendement. Durant la période de

la floraison à la véraison, une petite taille des raisins avec un ratio pellicule/pulpe élevé. Ceux-ci sont plus concentrés en certains composés tels que les tanins et pigments et ont une teneur faible en acide malique (Ojeda et al, 2002 ; Roby et al, 2004 ; Barbeau et al, 2008 ; Neethling, 2010 ).

L'alimentation hydrique agit également directement sur la vigueur de la vigne mesurée par le poids de bois de taille. La vigueur est caractérisée par un développement de la surface foliaire. Hall et al (2001) ont montré qu'il existe une corrélation positive entre la densité foliaire et le rendement (poids des baies). Cependant une vigueur trop importante n'est pas un avantage pour la qualité finale du raisin car elle induit une acidité élevée et une diminution de la coloration des baies (Bodin et al, 2003). Une partie végétative trop développée peut aussi conduire à l'augmentation de maladies cryptogamiques, due à un manque d'aération des grappes (Barbeau et al, 2008).

#### V.1.1.1. **Les conditions climatiques**

La température, les précipitations et l'ensoleillement sont les paramètres entrant en compte en viticulture. Ces paramètres ont un rôle majeur sur la qualité finale des baies car ils influencent le déroulement de la photosynthèse et par conséquent l'accumulation de sucre dans les baies, mais aussi leur rôle dans l'accumulation des composés phénoliques est important. L'importance de l'exposition au soleil et de l'alimentation en eau sur la synthèse des tanins condensés responsables de nombreuses propriétés de vin (la couleur, l'amertume et l'astringence), a été clairement montrée par Cadot et al (2006). La dégradation de l'acide malique en cours de maturation est augmentée par l'effet des hautes températures diurnes et nocturnes ainsi que par la contrainte hydrique (Calo et al, 1996). Les précipitations agissent sur le régime d'alimentation hydrique de la vigne qui est également sous la dépendance du type de sol. La vigne préfère 400 à 600 mm d'eau par an mais il est important que les pluies soient bien réparties au cours du cycle végétatif et reproductif. Selon Carbonneau et al (1992), l'accumulation des anthocyanes dans les pellicules est favorisée par un état de stress hydrique modéré de la plante, par des températures diurnes relativement élevées mais sans excès, avec probablement une interaction positive avec des températures nocturnes fraîches.

## **V.1.2. Hétérogénéité à l'échelle de la grappe.**

### **V.1.2.1. Impact sur la qualité des raisins de l'exposition des grappes au soleil**

Les pratiques culturales telles que le type de conduite de la vigne ou encore les techniques d'effeuillage sont des facteurs d'intervention humaine qui vont faire varier l'exposition des grappes (Dufourcq et al, 2006). De nombreux travaux ont montré que la suppression d'une partie des feuilles au niveau de la zone des grappes permet d'en améliorer le microclimat (aération, lumière) et influe sur la qualité des raisins.

Des mesures d'éclairement effectuées par Schneider et al (2002) montrent que les grappes naturellement à l'ombre du feuillage reçoivent un éclairement d'environ 2,5% de la valeur de l'éclairement incident sur les grappes ensoleillées. Des différences significatives sont observées entre la quantité en sucre et l'acidité totale trouvées entre les baies issues de grappes éclairées et de grappes témoins. Les baies des grappes éclairées sont toujours plus mures que celles des témoins. A l'inverse un trop fort ombrage des grappes fait diminuer le taux de sucres des baies. Cette diminution résulte à la fois d'une maturité en général plus tardive et du faible éclairement. L'exposition des grappes au soleil favorise également la synthèse des polyphénols. En moyenne, l'effeuillage permet d'augmenter le potentiel polyphénolique de 30 à 50 %. Cet effet est plus marqué avec un effeuillage à la nouaison. L'effeuillage sur deux faces accentue ces gains quelle que soit la date à laquelle il est pratiqué (IFV, 2009).

### **V.1.2.1. Hétérogénéité physique et biochimique des baies**

L'hétérogénéité au sein d'une grappe est initiée au moment de la floraison qui est une période pouvant durer une quinzaine de jours. L'initiation de la floraison est connue pour être plus précoce pour les fleurs situées en bas de grappe par rapport au haut de la grappe (Ewart et Kliewer, 1977 ; Ebadi et al, 1995). Des températures basses au moment de la floraison (< 20°C) et des précipitations induisent une durée plus longue de la période de floraison qui peut conduire à des écarts de développement entre les baies plus marquées. A l'inverse une floraison qui a lieu dans des conditions plus favorable (températures élevées, faible pluviométrie) sera plus rapide dans le temps et limitera l'hétérogénéité lié à

l'apparition des fleurs sur la grappe. Après la floraison, la fécondation est elle-même influencée par divers facteurs, notamment le facteur climatique. Selon Huglin et Schneider (1998), de mauvaises conditions climatiques (température basse, pluviométrie importante) lors de floraison entraînent la parthénocarpie (développement du fruit sans fécondation) de certaines baies. Ce développement anormal du fruit conduit à la formation de baies de plus petites tailles et sans pépins sur une même grappe. Ce phénomène est plus communément appelé le millerandage.

Pour les baies fécondées, la taille variable au sein d'une même grappe est soumise à l'influence de plusieurs facteurs. En plus de l'action de facteurs liés à l'importation de carbone, de l'état hydrique de la plante, de la température (microclimat des grappes et de la végétation), et de la nutrition azotée, le développement de la baie est dépendant de la présence ou non de pépins viables sachant qu'un seul pépin est nécessaire et suffisant pour le développement du fruit (Deloire, 2007). Dans un même lot de baies la taille moyenne des baies de raisin augmente avec le nombre de pépins, cependant il est possible pour ce même lot d'avoir des baies présentant la même taille mais avec un nombre de pépins différents (Deloire, 2007).

L'hétérogénéité de la grappe peut également être due au phénomène de coulure. La coulure est due à un afflux insuffisant de sucres vers les fleurs et les grains qui entraîne une chute de la baie. Le problème de cet afflux de sucres vient directement de la photosynthèse puisque que c'est elle qui est à l'origine de la production de ces sucres. Or, des conditions climatiques fraîches (<10°C) entraînent une diminution de l'activité photosynthétique. A l'inverse, le phénomène de coulure peut également être dû à une température trop élevée qui va engendrer un stress hydrique au niveau de la feuille. Ce stress aura pour conséquence une diminution de la photosynthèse (Huglin et Schneider, 1998). Il est possible de diminuer l'impact de la coulure en diminuant la demande des organes concurrentiels que sont principalement les bourgeons apicaux des rameaux, par opération de rognage ou d'écimage (Huglin et Schneider, 1998).

La quantité d'eau impacte également sur le nombre moyen de pépins dans la baie qui lui-même influence leur volume. Pour qu'une baie se développe correctement il faut qu'elle

possède au minimum un pépin bien formé (Deloire, 2007). Sous stress hydrique le nombre de pépins contenu dans la baie est généralement plus élevé (Attia, 2007). Le stress hydrique a donc une influence sur l'hétérogénéité des baies au sein d'une même grappe. Ce stress hydrique aura également une incidence sur la vigueur or un excès de vigueur modifie l'éclaircissement, la température et le niveau d'humidité ambiante de la zone des grappes.

Enfin, l'hétérogénéité liée à la position de la baie sur la grappe a montré que les baies situées à l'intérieur de la grappe sont souvent moins mûres que les autres. En effet, dans une grappe, les raisins se sont formés, ont végré et ont mûri les uns après les autres sur une période pouvant atteindre deux semaines et plus. Sur la base de ce constat Carbonneau et al (1991) affirmaient déjà qu'il existait une hétérogénéité au sein même de la grappe puisqu'ils ont proposé une nouvelle technique de suivi de maturation basée, notamment, sur une tendance de la moitié inférieure des grappes à être légèrement plus mûre que la moitié proche du pédoncule.

## **V.2. Les protocoles d'échantillonnage**

Le prélèvement et l'échantillonnage des baies sont essentiels dans l'évaluation de la qualité car ils se doivent d'être le plus représentatif possible de la parcelle tout en tenant compte de l'hétérogénéité existante. Ces méthodes doivent donc assurer un prélèvement reproductible afin de pouvoir comparer entre eux soit des parcelles, des dates, des millésimes ou des systèmes de conduites différents. En Val de Loire les protocoles d'échantillonnages globaux les plus fréquemment utilisés sont ceux de l'ITV (Vinssonneau et Anneraud, 2008) et ceux issus de Carbonneau et al (1991).

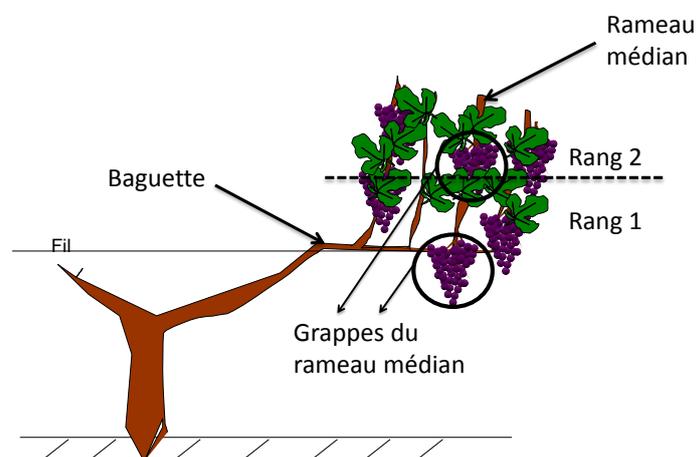
### **V.2.1. Protocole ITV**

Ce protocole d'échantillonnage est basé sur une approche globale qui se veut représentative de la parcelle étudiée. Deux rangs de vigne consécutifs sont repérés et seuls des ceps sains sont sélectionnés pour réaliser le prélèvement. Les ceps localisés en bordure de rang ne sont pas choisis. Les prélèvements se font sur les deux faces des rangs, où alternativement les grappes situées en position haute et basse du rameau médian de la baguette sont prélevées d'un cep à l'autre (**Figure 15**). Pour chaque grappe un maximum de 5 baies est prélevé sur

différentes positions de la grappe. Pour être complet l'échantillonnage doit atteindre un minimum de 200 baies qui seront ensuite placées dans un bac en plastique avant le transport au laboratoire.

### V.2.2. Protocole Carbonneau

Ce protocole est, à l'instar du protocole IFV, basé sur une approche globale représentative de la parcelle. La différence étant que le prélèvement ne se limite pas à deux rang de vigne mais est réparti sur l'ensemble de la parcelle sur des ceps sains à l'exception de ceux appartenant à des rangs extrêmes ou ceux en bordure de rang. Les baies sont récoltées sur les grappes de rang 1 du rameau médian **Figure 15**.



**Figure 15. Méthode d'échantillonnage sur un cep de vigne.**

## V.3. Conclusion

D'après la littérature, il existe en viticulture une hétérogénéité et une variabilité non négligeable de la vendange sous l'influence de nombreux facteurs. Cette hétérogénéité se manifeste par des différences au niveau de paramètres physiques et physiologiques des baies. Toutefois, il existe peu d'information sur l'impact de facteurs d'hétérogénéité et de l'hétérogénéité physique et physiologique sur l'évolution des propriétés mécaniques de baies au cours de la maturation. Il reste donc des verrous techniques et scientifiques à lever d'où l'importance de notre travail d'évaluer la nature des liens entre la variabilité de la matière première et l'expression de leurs propriétés mécaniques au cours de la maturation.



# **Problématique et démarche expérimentale**



## Problématique et démarche expérimentale

L'étude bibliographique a permis de mettre en évidence l'intérêt de la mesure de texture sur raisin pour une évaluation multicritères de la qualité. L'essor qu'a connu l'étude de la qualité texturale des raisins de cuves, s'explique entre autres par le lien qui a été montré entre les variations d'extractibilité des composés phénoliques et les propriétés mécaniques des baies. En effet la résistance et l'élasticité de la pellicule sont en lien avec la diffusion des composés phénoliques au cours de la transformation du raisin en vin.

Bien qu'encourageantes, les méthodes instrumentales de mesure de la texture sur raisin soulèvent des verrous techniques et scientifiques et les propriétés mécaniques des raisins ne sont pas encore intégrées comme un critère analytique systématique de la qualité dans la filière viti-vinicole. Certaines questions doivent être étudiées, notamment celle concernant l'indentification à une échelle plus fine des phénomènes responsables de la variation des propriétés mécaniques du raisin pendant la maturation. Certaines équipes ont montré que la turgescence des cellules et les propriétés mécaniques des baies de raisins pouvaient être liées (Thomas et al, 2006 ; Matthews et al, 2009). Globalement ces éléments semblent montrer l'importance de la compartimentation de l'eau (apoplastique et vacuolaire) dans l'évolution de la texture. Cependant, la littérature a montré qu'il est difficile d'observer une évolution significative des paramètres de texture au cours de la maturation, alors qu'il est avéré que la baie subit un brusque ramollissement après véraison. De plus, il n'y a pas de méthode encore suffisamment efficace permettant d'évaluer significativement l'évolution de la qualité texturale de baies d'une date de maturation à l'autre. La littérature à ce sujet montre également peu de consensus d'une étude à l'autre, notamment dans le choix des termes définissant des mêmes paramètres de texture (ex : Grad1/Module de Young ; Berry hardness/Fmax), ou encore dans le choix des conditions expérimentales (vitesse de mesure, % de déformation, diamètre de l'aiguille de pénétration...). Cette disparité entraîne l'impossibilité d'une comparaison des résultats entre les différentes études.

La variabilité biologique des baies est un sujet bien connu des spécialistes de la physiologie de la vigne et des raisins. Cette variabilité est sous l'influence de facteurs génétiques et environnementaux, qui s'exprime par une hétérogénéité physique et physiologique des baies récoltées à une même date ou à des dates différentes. Mieux comprendre cette

variabilité notamment au sein d'une grappe de raisin nous semble essentiel pour comprendre l'évolution des propriétés mécaniques des baies de raisin au cours de la maturation.

La problématique de cette thèse est de mieux comprendre la variabilité des paramètres de propriétés mécaniques en vue d'identifier de potentiels marqueurs de la maturité texturale. Pour y répondre, 3 objectifs ont été définis :

1. **Evaluer la capacité de discrimination** de différentes techniques instrumentales de mesure de la texture des baies de raisin.
2. **Etudier** les sources d'hétérogénéité physique et physiologiques d'un échantillon (à l'échelle de la grappe et de la baie et d'évaluer leur lien avec les propriétés mécaniques mesurées
3. **Comprendre** les phénomènes impliqués dans les modifications des propriétés mécaniques des baies de raisin

Afin d'atteindre ces 3 objectifs, la démarche expérimentale (**Figure 16**) est constituée des différentes étapes décrites ci-dessous :

- **Choix et validation de la mesure de texture et du matériel végétal :**

Avant de s'engager dans l'étude de la variabilité texturale des grappes au cours de la maturation, il a fallu choisir le matériel végétal parmi les deux variétés de raisins de cuves majoritaires dans la Vallée de la Loire que sont le Cabernet Franc et le Chenin. Il nous fallait également choisir la mesure de la texture la plus adaptée pour la suite de nos travaux. Pour cela nous avons comparé le pouvoir discriminant de cinq méthodes instrumentales de mesure de la texture évaluée à trois niveaux : au niveau inter-variétales, la capacité de ces méthodes à distinguer les propriétés mécaniques du Cabernet Franc de celles du Chenin ; au niveau intra-variétale, la capacité de ces méthodes à différencier des parcelles d'origines différentes; et au niveau de la maturation, la capacité de ces méthodes à différencier les stades de maturité des raisins.

- **Impact de l'hétérogénéité des baies sur la mesure de texture :**

Une analyse baie à baie de grappes de raisin Cabernet Franc a été effectuée tout au long de leur maturation dans le but de caractériser leur hétérogénéité physique, physiologique et texturale. L'analyse de la variance a été utilisée pour traiter l'ensemble des données et la

significativité de l'évolution des paramètres en fonction de la date de maturation pour deux millésimes 2011 et 2012. De plus, l'évolution des principaux paramètres physiques, physiologiques et texturaux est caractérisée sous l'influence de facteurs tels que la position de la baie sur la grappe ou encore l'impact de l'exposition à l'ombre ou de la lumière des grappes.

- **Comprendre les phénomènes impliqués dans les modifications des propriétés mécaniques des baies de raisin :**

L'étude de l'hétérogénéité physique, physiologique et texturale des baies tout au long de la maturation sur deux millésimes génère une grande base de données. Le traitement statistique de ces données est effectué par l'analyse de la variance (ANOVA), l'analyse des corrélations et l'établissement de modèles de prédiction de régression multivariés entre les paramètres de double compression et les autres paramètres. Ceci permettant d'identifier les facteurs responsables de la variabilité de la mesure de texture et ainsi d'adapter une nouvelle stratégie d'échantillonnage destiné à un suivi de la maturité texturale par des méthodes instrumentales.

Les méthodologies mises en œuvre afin de répondre aux objectifs présentées sont détaillées dans le chapitre suivant.

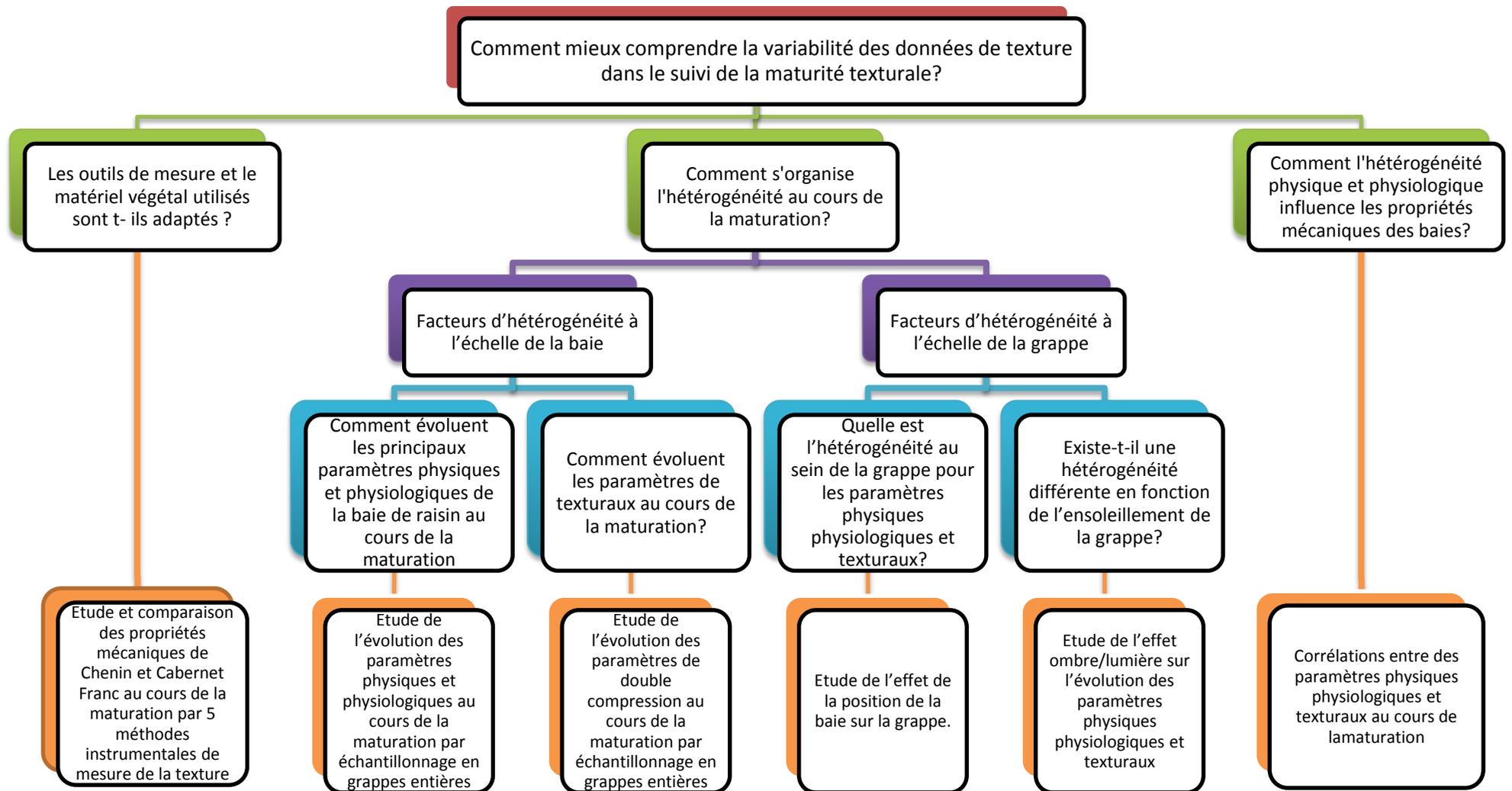


Figure 16. Schéma récapitulatif de la démarche expérimentale adoptée.

# Matériels et méthodes



## Matériels et méthodes

### I. Matériel végétal

#### I.1. Les cépages

Le choix des cépages s'est porté sur deux variétés de raisin de cuve, le Cabernet Franc et le Chenin car celles-ci correspondent respectivement aux variétés rouges et blanches les plus représentées dans les vignobles du Val de Loire. Les travaux concernant la qualité des raisins et des vins issus de ces deux variétés sont également nombreux.

Le Cabernet Franc est un cépage originaire du Sud-Ouest de la France. Ce cépage noir appartient à la famille des Carmenets au même titre que le Cabernet Sauvignon mais diffère notamment de ce dernier par des propriétés aromatiques plus développées mais possédant moins de polyphénols et de tannins. Le Cabernet Franc est un cépage moyennement sensible aux maladies du bois et à la pourriture, en revanche il est sensible aux cicadelles et craint le stress hydrique.

Le Chenin Blanc trouve son origine en Anjou (E.N.T.A.V, 1995) et est adapté aux différents mésoclimats de cette région. Ce cépage donne des grappes de taille moyenne assez compactes dont les baies sont plus ou moins petites, jaune doré, à pellicule fine et de pulpe dense (Galet, 1998). Son débourrement est précoce, réputé vigoureux, capable d'apporter des rendements modérés à très élevés selon les clones, porte-greffes et le sol où il est planté (Pasquini, 2002). Il craint peu le stress hydrique à condition que sa charge soit maîtrisée. Il est sensible aux maladies notamment à la pourriture grise, à l'oïdium et aux maladies du bois mais résiste bien au mildiou et au black rot (Galet, 1998). Sa production conduit à différents types de vins blancs (effervescents, secs, liquoreux), selon les conditions du milieu et les pratiques culturales et œnologiques (Barbeau et al, 2004).

#### I.1. Les parcelles

Les sept parcelles sélectionnées font partie du réseau de l'IFV Val de Loire–Centre (**Figure 17**). Angers et sa région possèdent des caractéristiques géologiques riches et contrastées et

le choix des parcelles a été fait de telle sorte que l'on retrouve cette diversité représentative de la région Anjou-Saumur et Touraine. En effet de par sa situation géographique, Angers se trouve à la frontière entre le massif Armoricaïn à l'Ouest et le bassin parisien à l'Est.

La première parcelle codée F2, de cépage Cabernet Franc, est située sur l'aire d'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) Bourgueil. Le sol est composé de craie friable et permet un enracinement profond avec un bon drainage et avec une profondeur du sol qui atteint 70 cm. Le potentiel de vigueur de cette parcelle est élevé et le potentiel de précocité est jugé normal. Ce sol permet des maturations poussées pour l'élaboration de vins rouges de garde.

(Source : [www.carto-techniloire.com](http://www.carto-techniloire.com), 2013)

**Tableau 2. Caractéristiques des parcelles sélectionnées pour le dispositif expérimental.**

Cépage	Codage Parcelle	Localisation géographique	Taille	Caractéristiques du sol
Cabernet Franc	F2	Bourgueil	Guyot simple	Craie sablo-limono-glaucouneuse et micacée
	F3	St Nicolas de Bourgueil	Guyot simple	Alluvions
	MB	Montreuil-Bellay	Guyot simple	Argile et roche marne ou superficiels sur des roches de calcaire dur
Chenin	F10	Chaudefond sur Layon	Guyot double	Métagrauwacke parfois friable
	F11	Chaudefond sur Layon	Guyot simple	
	F19	Vauchrézien	Guyot simple	Altérite de roche schisto-gréseuse
	F36	Vauchrézien	Guyot double	

La deuxième parcelle codée F3, de cépage Cabernet Franc, est située sur la zone d'AOC St Nicolas de Bourgueil. La texture sableuse rend ce sol sensible au lessivage des éléments fertilisants. Ce terroir est adapté à la production de vins légers et fruités grâce à sa maturité précoce. (Source : [www.carto-techniloire.com](http://www.carto-techniloire.com), 2013)

Les parcelles 3 et 4 codées F10 et F11 respectivement, de cépage Chenin, sont situées à Chaudefond-sur-Layon. La texture de surface du sol est de type limon argilo-sableux, avec une profondeur de sol de 50 cm. Les capacités de drainage du sol sont correctes. Le potentiel de vigueur est moyen et le potentiel de précocité va de normal à plus précoce que la moyenne. (Source : [www.carto-techniloire.com](http://www.carto-techniloire.com), 2013)

Les parcelles 5 et 6 codées F19 et F36 respectivement, de cépage Chenin, sont situées à Vauchrézien. La texture du sol en surface est de type limon argilo-sableux, avec une profondeur de sol supérieure à 120 cm. Ces parcelles possèdent un fort potentiel de vigueur et un potentiel de précocité de normal à tardif. (Source : [www.carto-techniloire.com](http://www.carto-techniloire.com), 2013)

La dernière parcelle est une parcelle de Cabernet Franc expérimentale de l'INRA d'Angers située à Montreuil-Bellay à 50km d'Angers sur le site du lycée viticole de la même commune. Cette plateforme expérimentale possède sa propre station météorologique. Le milieu viticole est une altération de roche marneuse. La texture de surface du sol est de type argileux avec une profondeur de sol dépassant les 120 cm permettant un drainage correct. La parcelle possède un potentiel de vigueur fort et un potentiel de précocité tardif. (Source : [www.carto-techniloire.com](http://www.carto-techniloire.com), 2013)

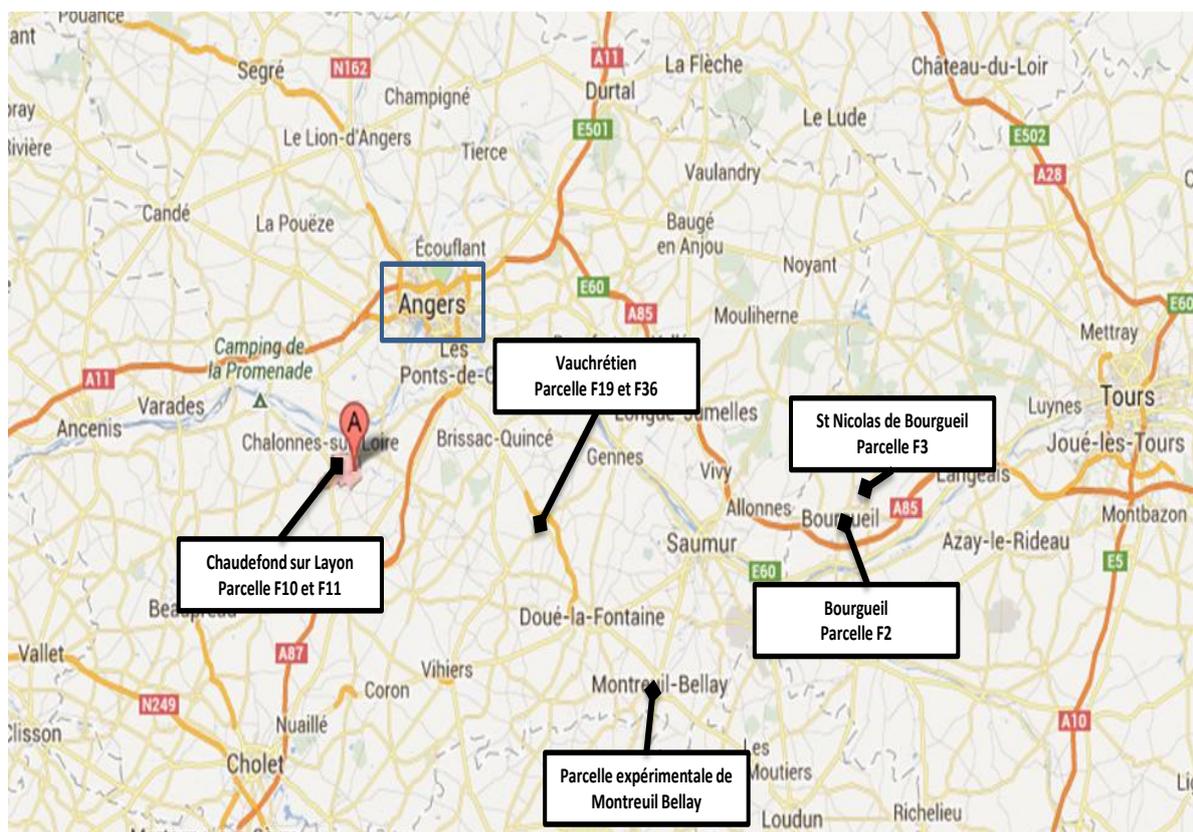


Figure 17. Localisation géographique des sept parcelles du dispositif expérimental (Source [www.Maps.google.fr](http://www.Maps.google.fr), 2013).

## II. Les millésimes

Les baies de raisins prélevées pour chacune des étapes de l'étude, sont issues de trois millésimes différents : 2010, 2011 et 2012. Interloire (organisme interprofessionnel des vins de Loire) a décrit la spécificité de ces millésimes sur la base du recueil des données météorologiques (températures, précipitations, ensoleillement...).

Au cours de l'année 2010 le climat de l'Anjou a été marqué par un hiver froid et peu de précipitations le long de l'année, ce qui a permis de maintenir un bon état sanitaire de la vigne et donc de limiter le nombre de traitements. Chacune des étapes de développement - débourrement-floraison-véraison-maturation a été marquée par un démarrage lent et un achèvement dans des conditions climatiques optimales (Interloire, 2011). Mais les jours précédents la dernière date de prélèvement, date C (**Tableau 3**), un fort épisode pluvieux a eu lieu dans la région à tel point que l'ensemble des raisins prélevés dans les parcelles de

Chenin étaient inexploitable. Les pellicules étant complètement fissurées ce qui n'a pas permis de réaliser les analyses de textures sur baie entière ou localisées sur ces raisins. Les baies de Chenin étaient fendues et trop botrytisées pour pouvoir être analysées. En revanche les raisins de Cabernet Franc ne présentaient pas de fissures dans leurs pellicules. L'année climatique 2011, de l'avis des professionnels de la filière, est considérée comme un modèle avec des conditions climatiques plus que favorable pour les étapes de développement de la vigne. Le printemps était chaud, sec et ensoleillé. Les conditions climatiques durant l'été étaient marquées par des températures fraîches et une pluviométrie élevée et la fin septembre était estivale ce qui a permis une récolte précoce. Pour la parcelle expérimentale de Montreuil-Bellay, les relevés de stades phénologiques effectués par l'équipe de l'INRA d'Angers ont montré que la parcelle avait atteint 50% de floraison à la date du 21 mai 2011 et le stade de mi-véraison était atteint à la date du 31 juillet 2011 (Interloire, 2012).

L'année 2012 a été marquée par un hiver doux et sec et de beaux jours au cours du mois de mars. Durant le mois d'avril, une longue période de pluies et d'orages a mis les vignobles du Val de Loire à rude épreuve qui a eu pour conséquence une forte baisse de rendement. Le mois de juillet offrait de beaux jours et des températures de saison mais la pluviométrie et le froid de fin septembre/début octobre n'ont pas permis d'avoir une fin de maturation et des conditions de vendanges correctes. La récolte a été en général plus faible que les années précédentes avec un faible rendement et une acidité élevée. Pour la parcelle expérimentale de Montreuil-Bellay, les relevés de stades phénologiques effectués par l'équipe de l'INRA d'Angers ont montré que la parcelle avait atteint 50% de floraison à la date du 09 juin 2012 et le stade de mi-véraison était atteint à la date du 21 août 2012 (Interloire, 2013).

Les principales données climatiques de la parcelle de Montreuil-Bellay (température moyenne, précipitations, rayonnement global durée d'insolation) au cours des millésimes 2011 et 2012 sont présentées en Annexe 4

### **III. Dates de prélèvements**

Les expérimentations menées au cours des trois millésimes étudiés ont été réalisées sur des raisins en cours de maturation. Pour le millésime 2010, trois dates de fin de maturation entre fin septembre et mi-octobre ont été choisies au rythme de un prélèvement par

semaine (**Tableau 3**). Les prélèvements ont été effectués sur les parcelles 2, 3, 10, 11, 19 et 36 dans le cadre de l'étude et la comparaison des propriétés mécaniques de cépage Cabernet Franc et Chenin par cinq mesures instrumentales de la texture.

Pour les millésimes 2011 et 2012, tous les prélèvements ont été effectués sur la même parcelle expérimentale de Montreuil-Bellay. En 2011 les prélèvements se sont étalés sur six semaines couvrant le début de la maturation jusqu'à la date de récolte. Chaque semaine deux prélèvements ont été réalisés, un le lundi et un le mercredi entre 9h et 11 h (Tableau 4). Pour le millésime 2012, les dates de prélèvement allaient de la mi-véraison jusqu'à la récolte et s'étaient étalées sur huit semaines au rythme de 2 prélèvements par semaine, un le lundi et un le mercredi entre 9h et 11 h, comme pour le millésime 2011 (**Tableau 5**).

**Tableau 3. Récapitulatif des dates de prélèvement pour le millésime 2010.**

Variété	Parcelle	Code	Date de prélèvement		
			Date A	Date B	Date C
Cabernet Franc	Bourgueil	2	27-sept-2010	04-oct-2010	11-oct-2010
	St Nicolas de Bourgueil	3	27-sept-2010	04-oct-2010	11-oct-2010
Chenin	Cha1	10	27-sept-2010	04-oct-2010	11-oct-2010
	Cha2	11	27-sept-2010	04-oct-2010	11-oct-2010
	Vau1	19	27-sept-2010	04-oct-2010	11-oct-2010
	Vau2	36	27-sept-2010	04-oct-2010	11-oct-2010

**Tableau 4. Récapitulatif des dates de prélèvement pour le millésime 2011.**

	Prélèvement lundi	Prélèvement mercredi
<b>Semaine 1</b>		17-août-2011
<b>Semaine 2</b>	22-août-2011	24-août-2011
<b>Semaine 3</b>	29-août-2011	31-août-2011
<b>Semaine 4</b>	05-sept-2011	07-sept-2011
<b>Semaine 5</b>	12-sept-2011	14-sept-2011
<b>Semaine 6</b>	19-sept-2011	

**Tableau 5. Récapitulatif des dates de prélèvement pour le millésime 2012.**

	<b>Prélèvement lundi</b>	<b>Prélèvement mercredi</b>
<b>Semaine 1</b>		22-août-2012
<b>Semaine 2</b>	27-août-2012	29-août-2012
<b>Semaine 3</b>	03-sept-2012	05-sept-2012
<b>Semaine 4</b>	10-sept-2012	12-sept-2012
<b>Semaine 5</b>	17-sept-2012	19-sept-2012
<b>Semaine 6</b>	24-sept-2012	26-sept-2012
<b>Semaine 7</b>	01-oct-2012	03-oct-2012
<b>Semaine 8</b>	08-oct-2012	10-oct-2012

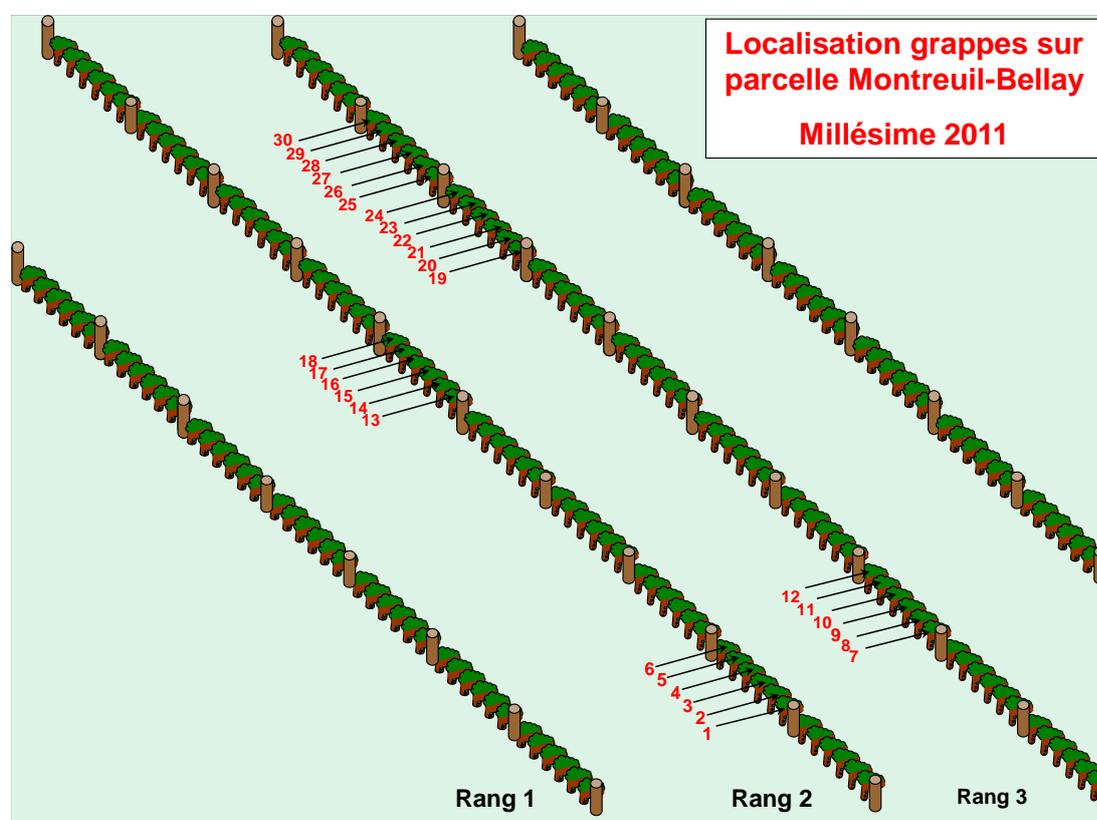
## **IV. Echantillonnage à la parcelle**

### **IV.1. Méthode d'échantillonnage globale**

Au cours du millésime 2010, l'étude et la comparaison des cépages Cabernet Franc et Chenin par cinq méthodes instrumentales de mesure de la texture a été faite sur la base d'un échantillonnage par une approche globale. Cette approche permet d'être représentatif de la parcelle. La méthode utilisée est celle de l'ITV (Visonneau et Anneraud, 2008). Cette méthode consiste à prélever aléatoirement sur deux rangs sélectionnés et identifiés, un total de 200 baies avec pédicelle en ne dépassant pas 3 à 5 baies par grappe. Les prélèvements sont effectués sur les deux faces du rang, mais les ceps situés en bord de rang ne sont pas pris en compte. Les baies sont ensuite placées dans des sacs de congélation identifiés par le nom de la parcelle et la date de prélèvement puis transportés au laboratoire.

## IV.2. Prélèvement grappes entières

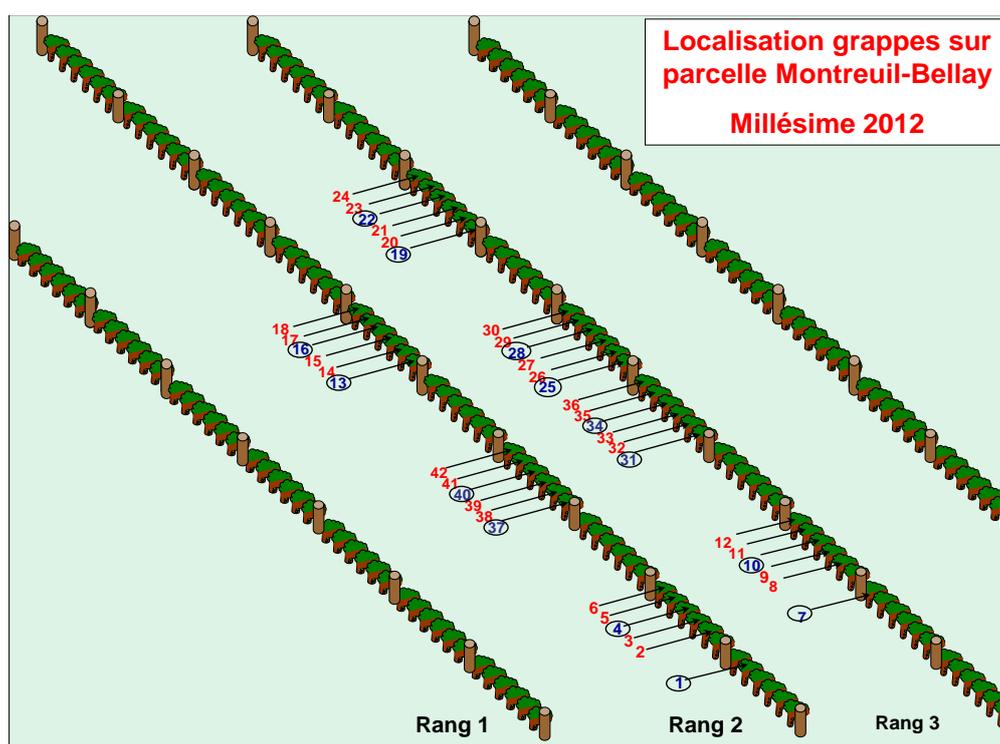
Dans le but d'étudier l'hétérogénéité existante entre les baies appartenant à une même grappe, le choix du protocole de prélèvement pour les millésimes 2011 et 2012 s'est axé sur des récoltes de grappes entières. Une première étape de repérage à la parcelle a été effectuée afin de sélectionner les futurs ceps de notre étude. Pour chaque date de prélèvement 3 ceps de vigueur comparable (nombre de grappes, surface foliaire, proximité...) ont été sélectionnés sur deux rangs de la parcelle. A chaque date de prélèvement et sur chacun des trois ceps, la grappe de rang 1 située sur le rameau médian est prélevée. Au cours du millésime 2011 un total de 30 grappes a ainsi été récolté sur 10 dates de prélèvements tout le long de la maturation (**Figure 18**).



**Figure 18. Localisation des ceps et numéro des grappes prélevées au cours du millésime 2011.**

Au cours du millésime 2012, lorsque l'état sanitaire de la vigne le permettait, les premières récoltes se sont effectuées sur les mêmes ceps que pour le millésime 2011. Mais en raison d'un décalage des stades phénologiques du millésime 2012 par rapport au millésime 2011 (+19 jours pour la mi-floraison et +21 jours pour la mi-véraison) de nouveaux ceps ont été

ajoutés à notre dispositif pour augmenter le nombre de prélèvements et pouvoir ainsi couvrir toute la période de maturation (**Figure 19, Tableau 6**). De plus, un dispositif de protection contre la lumière du soleil de certaines grappes (**Figure 20**) a été mis en place dès la date du 22 août 2012 afin de pouvoir comparer l'effet de l'ombre ou de la lumière sur la maturation des raisins. Ainsi pour chaque date de prélèvement, une grappe sur trois possédait le dispositif de protection contre les rayonnements lumineux solaires, les deux autres étaient laissées dans les conditions naturelles d'ensoleillement.



**Figure 19. Localisation des ceps et numéros des grappes prélevées au cours du millésime 2012. Les grappes numérotées en bleues et cerclées de noir correspondent à celles ayant un dispositif d'ombrage.**



**Figure 20. Photo du dispositif d'ombrage des grappes.**

**Tableau 6. Dates de prélèvements et numéros de grappes associés pour les millésimes 2011 et 2012.**

	Millésime 2011					Millésime 2012				
Date de mi-floraison	21 mai					09 juin				
Date de mi-veraison	31 juillet					21 août				
Numéro grappe	Nombre de baies	Date de prélèvement	Jours après floraison	Jours après véraison	Ombre/lumière	Nombre de baies	Date de prélèvement	Jours après floraison	Jours après véraison	Ombre/lumière
1	158				Lumière	121				Ombre
2	122	17-août	88	17	Lumière	103	27-août	79	6	Lumière
3	165				Lumière	128				Lumière
4	97				Lumière	83				Ombre
5	145	22-août	93	22	Lumière	113	29-août	81	8	Lumière
6	131				Lumière	128				Lumière
7	84				Lumière	111				Ombre
8	96	24-août	95	24	Lumière	78	03-sept	86	13	Lumière
9	88				Lumière	95				Lumière
10	111				Lumière	120				Ombre
11	95	29-août	100	29	Lumière	125	05-sept	88	15	Lumière
12	104				Lumière	156				Lumière
13	101				Lumière	84				Ombre
14	108	31-août	102	31	Lumière	144	10-sept	93	20	Lumière
15	124				Lumière	88				Lumière
16	121				Lumière	106				Ombre
17	101	05-sept	107	36	Lumière	106	12-sept	95	22	Lumière
18	119				Lumière	95				Lumière
19	137				Lumière	69				Ombre
20	116	07-sept	109	38	Lumière	97	17-sept	100	27	Lumière
21	106				Lumière	64				Lumière
22	125				Lumière	102				Ombre
23	117	12-sept	114	43	Lumière	105	19-sept	102	29	Lumière
24	130				Lumière	85				Lumière
25	111				Lumière	102				Ombre
26	128	14-sept	116	45	Lumière	100	24-sept	107	34	Lumière
27	158				Lumière	126				Lumière
28	122				Lumière	112				Ombre
29	165	19-sept	121	50	Lumière	131	26-sept	109	36	Lumière
30	97				Lumière	113				Lumière
31						75				Ombre
32						91	01-oct	114	41	Lumière
33						151				Lumière
34						104				Ombre
35						99	03-oct	116	43	Lumière
36						74				Lumière
37						71				Ombre
38						91	08-oct	121	48	Lumière
39						90				Lumière
40						91				Ombre
41						76	10-oct	123	50	Lumière
42						115				Lumière

## V. Echantillonnage au laboratoire

### V.1. Baies issues de l'échantillonnage global

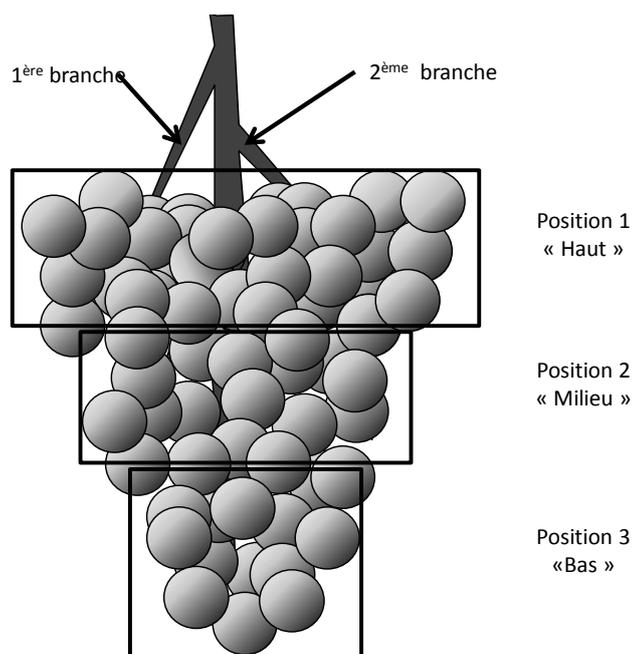
Au laboratoire les 250 baies récoltées pour chaque parcelle sont réparties de façon aléatoire en 5 lots de 50 baies. Chacun des lots servira ensuite à réaliser une des cinq mesures instrumentales de la texture que sont : la double compression 20%, la compression 70%, la pénétrométrie, la traction sur pellicule et la traction sur pédicelle. Afin de répartir de manière homogène les baies dans les lots de façon aléatoire un système de planche à trous a été mis au point au laboratoire (Figure 21).



Figure 21. Système de planche à trous permettant de répartir aléatoirement 100 baies.

### V.2. Baies issues du prélèvement en grappe entière

Les baies de chaque grappe sont regroupées en fonction de leur position sur la grappe dans trois classes distinctes, chacune représentant un tiers du nombre total de baies sur la grappe. La première classe « Haut » correspond aux baies situées sur les deux premières branches latérales de la rafle. La deuxième et la troisième classe correspondent respectivement aux baies situées au « Milieu » et en « Bas » de la grappe (Figure 22).



**Figure 22.** Schéma représentatif de la classification des baies en fonction de leur position sur la grappe.

## **VI. Mesure instrumentale de la texture des raisins :**

### **VI.1. La double compression 20%**

Des mesures de double compression ont été effectuées au cours des millésimes 2010, 2011 et 2012 pour chaque modalité (une date, une parcelle) sur des baies fraîches entières avec pédicelle. Pour le millésime 2010, 30 baies issues du protocole d'échantillonnage de l'approche globale sont analysées. Pour les millésimes 2011 et 2012 toutes les baies issues des prélèvements en grappes entières sont analysées. Le texturomètre utilisé est une machine de traction universelle (MTS Universal, modèle Synergie 200H), équipé d'une sonde cylindrique à extrémité plane de 15 mm de diamètre. Le capteur de force utilisé est de 50 Newton (N). La baie est placée en position équatorial et est comprimée à 20% de sa hauteur, deux fois successivement à une vitesse constante de 50 mm/min. La valeur du taux de déformation et de la vitesse de compression sont extraits de méthodes déjà mises au point au laboratoire GRAPPE par les travaux de Le Moigne (2008) et de Maury et al (2009).

Une mesure dure environ une quinzaine de secondes et est caractérisée par deux cycles identiques : une phase de charge (compression) et de décharge (décompression) sur la baie.

A l'issu de la mesure, les courbes Force/Temps (**Figure 23**) permettent d'extraire neuf paramètres :

- La force maximale à la première compression **F1** mesurée en (N);
- La force maximale à la deuxième compression **F2** mesurée en (N) ;
- L'énergie liée à la première compression **W1**, mesurée en (mJ) ;
- L'énergie liée à la deuxième compression **W2** mesurée en (mJ) ;
- La pente au départ du premier cycle de compression **Grad0**, mesurée en (N/mm) ;
- La pente à la première compression **Grad 1** mesurée en (N/mm) ;
- La pente à la deuxième compression **Grad 2** mesurée en (N/mm) ;
- La **cohésion** qui est un paramètre secondaire calculé en faisant le rapport entre **W2** et **W1**.
- Le **gommeux** mesuré en (N) qui est le produit de **F1** et de la **cohésion**.

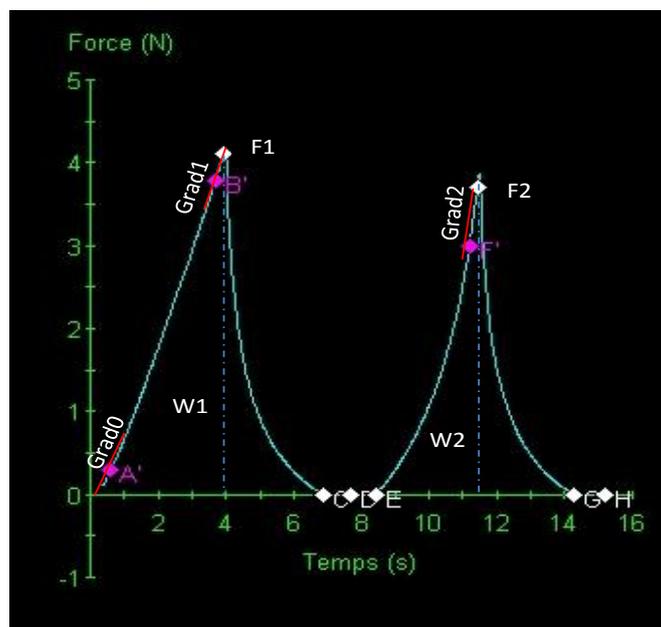


Figure 23. Courbe obtenue à l'issu d'un cycle de double compression 20%.

## VI.2. La compression destructive 70%

Au cours du millésime 2010, les mesures de simple compression 70% sont effectuées sur des lots de 30 baies de raisin frais issues du protocole d'échantillonnage de l'approche globale, à l'aide de la machine de traction universelle équipée d'une sonde cylindriques à extrémité plane de 15 mm de diamètre. Les baies sont placées en position équatoriale puis comprimées à une vitesse constante de 80 mm/min à 70% de leur hauteur. Les courbes Force/Déformation (**Figure 24**) qui en découlent permettent l'analyse des paramètres suivants :

- La force maximale au cours du cycle de compression  $F_{max}$  en (N) ;
- L'énergie maximale au cours du cycle de compression  $W_{max}$  (mJ).

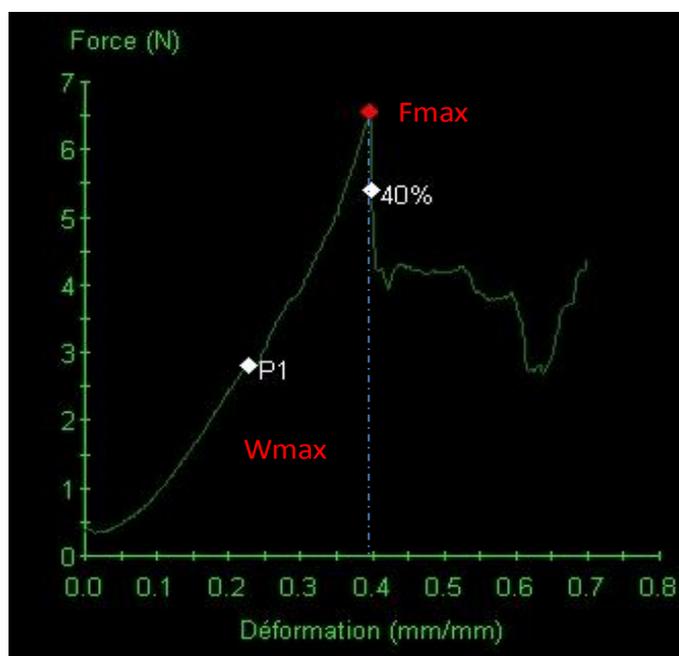


Figure 24. Courbe obtenue par compression à 70% des baies.

## VI.3. La pénétrométrie

Au cours du millésime 2010, les mesures de pénétrométrie sont effectuées sur 30 baies fraîches issues du protocole d'échantillonnage de l'analyse globale à l'aide d'une machine de traction universelle (Universal, modèle Synergie 200H). Les baies sont pénétrées en position équatoriale par une sonde métallique de 0.16 mm de diamètre à une vitesse de 8 mm/min jusqu'à rupture de la pellicule. Les paramètres de la mesure sont issus de la méthode

décrite par Maury et al (2009) qui ont comparé différentes vitesses de déplacement de la sonde.

A l'issu des mesures, les paramètres qui découlent de la courbe Force/Déformation (**Figure 25**) sont les suivant :

- La force à la rupture  $F_{max}$  (N) ;
- L'énergie nécessaire pour rompre la pellicule  $W$  (mJ) ;
- La pente associée à la force à la rupture  $Grad$  (N/mm) ;
- L'allongement maximum  $Al_{max}$  (mm) qui correspond à la distance parcouru par la sonde avant rupture de la pellicule.

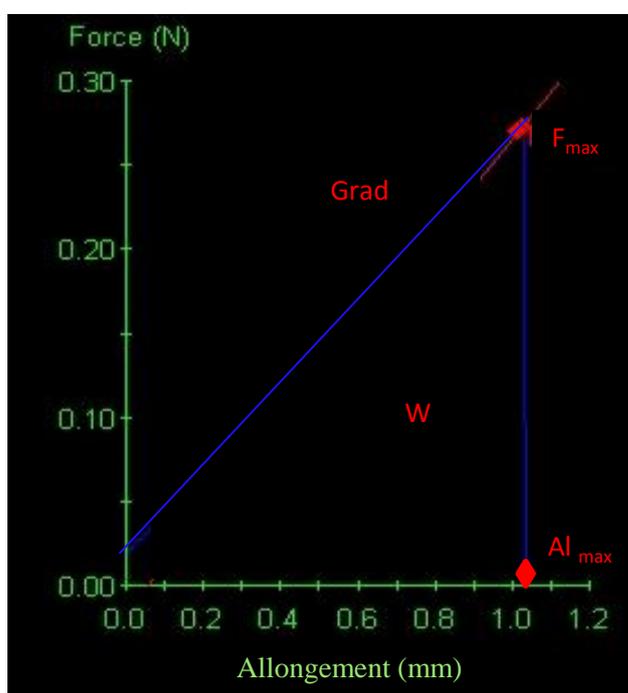


Figure 25. Courbe obtenue après la mesure de pénétrométrie sur baie entière.

#### VI.4. La traction sur pédicelle

Au cours du millésime 2010, les mesures de traction sur pédicelle sont effectuées sur 30 baies fraîches issues du protocole d'échantillonnage de l'analyse globale à l'aide d'une machine de traction universelle (Universal, modèle Synergie 200H). Durant la traction une pince accroche la baie au niveau du pédicelle et passe à travers une plateforme percée d'un trou de 5 mm de diamètre tandis que le reste de la baie reste bloqué sous la plateforme

(Figure 26). La vitesse de traction est de 8 mm/min. Ce dispositif permet de déterminer les paramètres suivant issus de la courbe Force-temps (Figure 27) :

- La force maximale ( $F_{max}$ ) pour détacher le pédicelle (N) ;
- L'allongement à la rupture  $Al_{max}$  (mm) ;
- L'énergie maximale  $W$  (mJ).

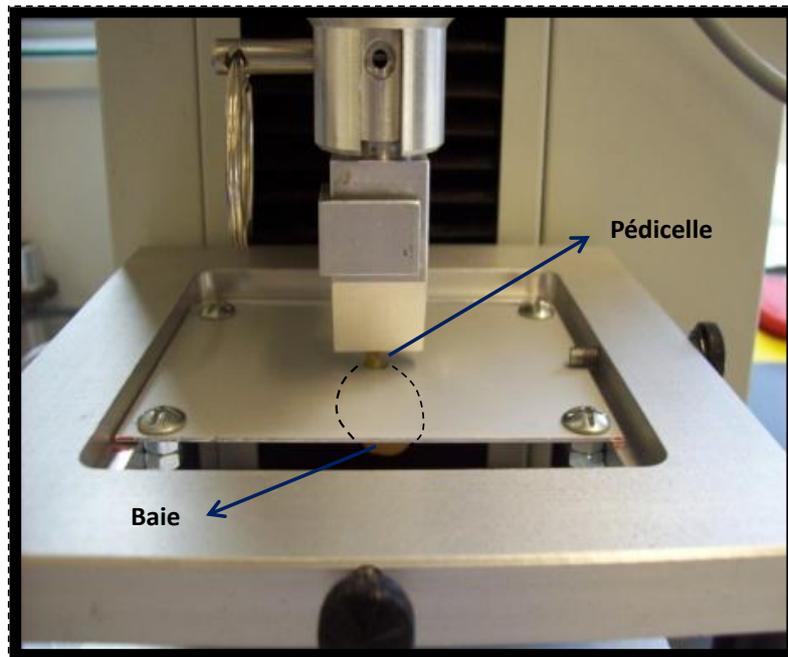


Figure 26. Dispositif expérimental de traction sur pédicelle.

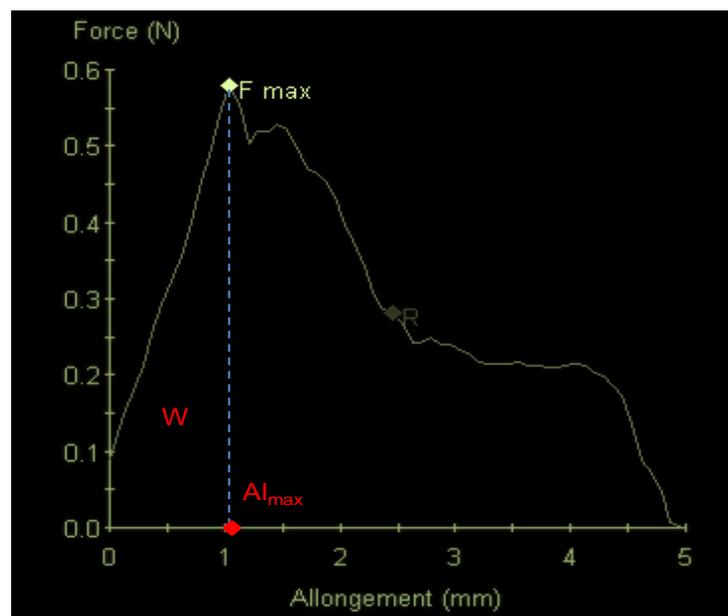
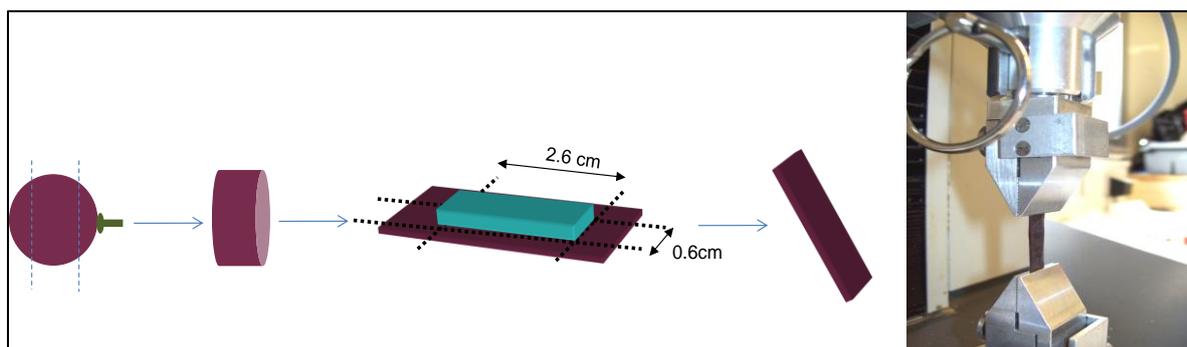


Figure 27. Courbe obtenue après traction sur pédicelle.

## VI.5. La traction sur pellicule

Au cours du millésime 2010, les mesures de traction sur pellicule sont effectuées à l'aide d'une machine de traction universelle (Universal, modèle Synergie 200H) sur 30 bandes de pellicules issues de 30 baies fraîches pelées. A l'aide d'un scalpel et d'un emporte-pièce, des éprouvettes rectangulaires de taille homogène (longueur : 2,6 cm ; largeur : 0,6 cm) sont obtenues puis placées entre les deux pinces de la machine et subissent une traction jusqu'à déchirure à une vitesse de 8 mm/min (**Figure 28**)



**Figure 28.** Schéma d'obtention des éprouvettes rectangulaires homogènes de pellicule de raisin.

La courbe Force-allongement (**Figure 29**) qui en découle permet d'obtenir les paramètres suivants :

- La force maximale ( $F_{max}$ ) pour déchirer la pellicule (N) ;
- L'allongement à la rupture  $AL_{max}$  (mm) ;
- L'énergie maximale  $W$  (mJ).

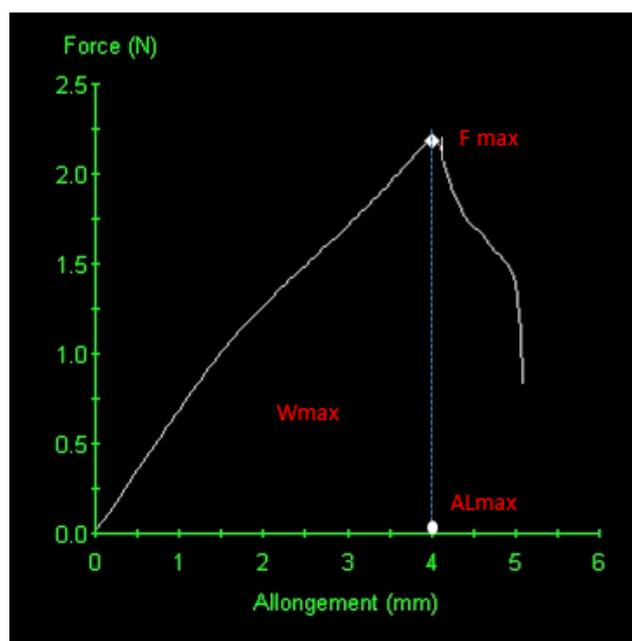


Figure 29. Courbe obtenue après traction sur pellicule.

## VII. Caractéristiques physiques et physiologiques des raisins au cours de la maturation

Afin de caractériser le plus largement possible chacune des baies de raisin en plus de la mesure de texture, une série d'expérimentation permettant d'obtenir des caractéristiques physiques et physiologiques de la baie est réalisée au cours des millésimes 2011 et 2012. L'objectif étant de regarder ces paramètres afin de voir si certains peuvent être explicatifs ou corrélés avec des paramètres de texture.

Les baies sont pesées et leur **poids frais** est exprimé en (g). La **taille** (mm) est un paramètre qui est donné directement lors de la mesure de double compression par le texturomètre. L'estimation de la **densité** est obtenue par flottaison des baies dans des solutions croissantes de chlorure de sodium : 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200 g/l de NaCl selon Fournand et al 2006. Les baies numérotées sont premièrement placées dans la solution de plus faible concentration. Si la baie flotte alors sa densité est inférieure ou égale à celle de la solution. Si la baie coule sa densité est supérieure à celle de la solution. Ainsi chacune des baies est passée successivement dans chacun des bains jusqu'à flottaison. L'estimation de la densité sera équivalente à celle de la solution de NaCl associée. Les baies sont ensuite rincées à l'eau courante afin d'enlever les résidus de sel, mises à sécher sur du

papier absorbant, placées dans un support creux en plastique numéroté, avant d'être congelée à  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  avant lyophilisation sous vide à  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Heto, LL 3000).

Pour le raisin, la lyophilisation a duré au minimum 48 h et afin de faciliter ce processus chacune des baies a été fendue au scalpel (Figure 30). A l'issue de ce séchage le **poids sec** (g) de la baie, son **volume d'eau** (ml) obtenu par la différence entre le **poids frais** et le **poids sec**, et le **% d'eau** sur la base du pourcentage par rapport au poids frais (%) sont établis. Puis, pour chaque baie, le **nombre de pépins** et le **poids des pépins** (mg) est déterminé avec une balance à précision. Les baies lyophilisées sont ensuite placées dans des tubes individuels numérotés, broyées mécaniquement à température ambiante avec une spatule avant d'être suspendues dans 4 ml d'eau ultra pure. Le moût ainsi obtenu est utilisé pour la détermination de la quantité de **solides solubles totaux** (TSS) par réfractométrie par mesure du °Brix à l'aide d'un réfractomètre digital (Refracto 30PX, Mettler, Tolède, Espagne). La valeur °Brix réelle est obtenue en rapportant la valeur mesurée au volume initial d'eau contenu dans la baie avant lyophilisation.



Figure 30. Lyophilisation des baies.

## VIII. Analyses statistiques

La grande base de données brutes engendrées par les mesures effectuées sur l'ensemble des échantillons a nécessité l'utilisation de plusieurs méthodes statistiques pour faciliter leur exploitation et interprétation. Les données sont traitées par analyse de la variance (ANOVA) et les différents groupes statistiques sont différenciés par le test LSD de Fisher (Least Significant Difference). Ces traitements sont réalisés avec le programme Statgraphics Plus v.5.1 (Sigma Plus, France) et le seuil de significativité alpha ( $\alpha$ ) est fixé à 0,05. A l'aide de ce même logiciel, des modélisations par régression linéaires simple ou multiples ont été réalisées. Des analyses en composantes principales normées (ACP) sont également réalisées sous le logiciel Stabox 6.6 Pro (Gimmer logiciels, 2002). Dans le but d'établir des liens entre différents paramètres étudiés, des calculs de coefficients Pearson ( $r$ ) et des modèles de régression sont effectués entre les variables.



## **Résultats et discussion**



## Résultats et discussion

### Chapitre 1: Evolution des propriétés mécaniques des raisins de Cabernet franc et de Chenin (*Vitis vinifera* L.) au cours de la maturation

Ce premier chapitre de résultats est consacré à la comparaison des propriétés mécaniques de deux cépages de cuve majoritaires du Maine et Loire : le Cabernet Franc (Rouge) et le Chenin (Blanc), par cinq méthodes instrumentales de mesure de la texture. Parmi les cinq méthodes testées on distingue celles qui permettent des mesures mécaniques tenant compte de la baie dans sa globalité, qu'elles soient destructives (compression 70%) ou non (double compression 20%), de celles qui permettent une analyse plus ciblée sur certaines zones de la baie (pénétrométrie, traction sur pellicule, traction sur pédicelle). La capacité de discrimination de ces mesures est évaluée à trois niveaux : une discrimination inter-variétales permettant la distinction entre le Cabernet Franc et le Chenin ; une discrimination intra-variétale permettant de différencier des parcelles d'origines différentes pour une même variété (2 parcelles de Cabernet Franc et 4 parcelles de Chenin) ; et une discrimination inter-dates permettant de différencier des stades de maturité des raisins. L'objectif final est la sélection pour la suite de notre étude, du matériel végétal de référence et de la technique de mesure instrumentale de la texture présentant le meilleur compromis entre ces trois niveaux de discrimination.

La première partie de ce chapitre est une comparaison des coefficients de variation de chacun des paramètres issus des cinq mesures de texture pour les variétés Chenin et Cabernet Franc. Cette étape nous renseigne sur le degré d'hétérogénéité des variétés, ainsi que les paramètres mettant le plus en évidence la variabilité des lots de baies étudiés.

La deuxième partie présente séparément la comparaison de la texture par chacune des cinq méthodes instrumentales testées. Des analyses descriptives permettent d'identifier les paramètres les plus pertinents pour un suivi de maturité texturale et la différenciation de parcelles pour les baies de Chenin et Cabernet Franc.

## I. Comparaison de la variabilité des paramètres mécaniques mesurés entre Chenin et Cabernet Franc

Les coefficients de variations de tous les paramètres de texture étudiés (cf. Matériels et méthodes) sont calculés indépendamment de la date de prélèvement pour comparer la variabilité entre les variétés Chenin et Cabernet Franc. Les données sont issues de mesures individuelles réalisées sur des lots de 30 baies prélevées selon le protocole ITV. Les résultats montrent des coefficients de variation des paramètres de texture relativement élevés, allant de 13% à 59% pour le Cabernet Franc et de 15% à 81% pour le Chenin (**Figure 31**). De manière générale, la variabilité observée pour le Chenin est plus forte que celle du Cabernet Franc. Pour chacune des techniques de mesure de la texture, le paramètre lié à l'énergie de compression ( $W$ ) présente les coefficients de variation les plus élevés. Le fort coefficient de variation de ce paramètre peut s'expliquer par le mode de calcul de l'énergie de compression exprimée en (mJ) faisant intervenir à la fois la force et la hauteur initiale de l'échantillon. Pour les deux variétés, le paramètre cohésion de la mesure de double compression 20% est celui dont le coefficient de variation est le plus faible avec des valeurs de  $CV = 13\%$  et  $CV = 15\%$  pour le Cabernet Franc et le Chenin, respectivement.

Cette analyse des lots est effectuée de façon globale indépendamment de la date et du type de parcelle et témoigne de la forte variabilité texturale des baies de raisins au cours de la maturation.

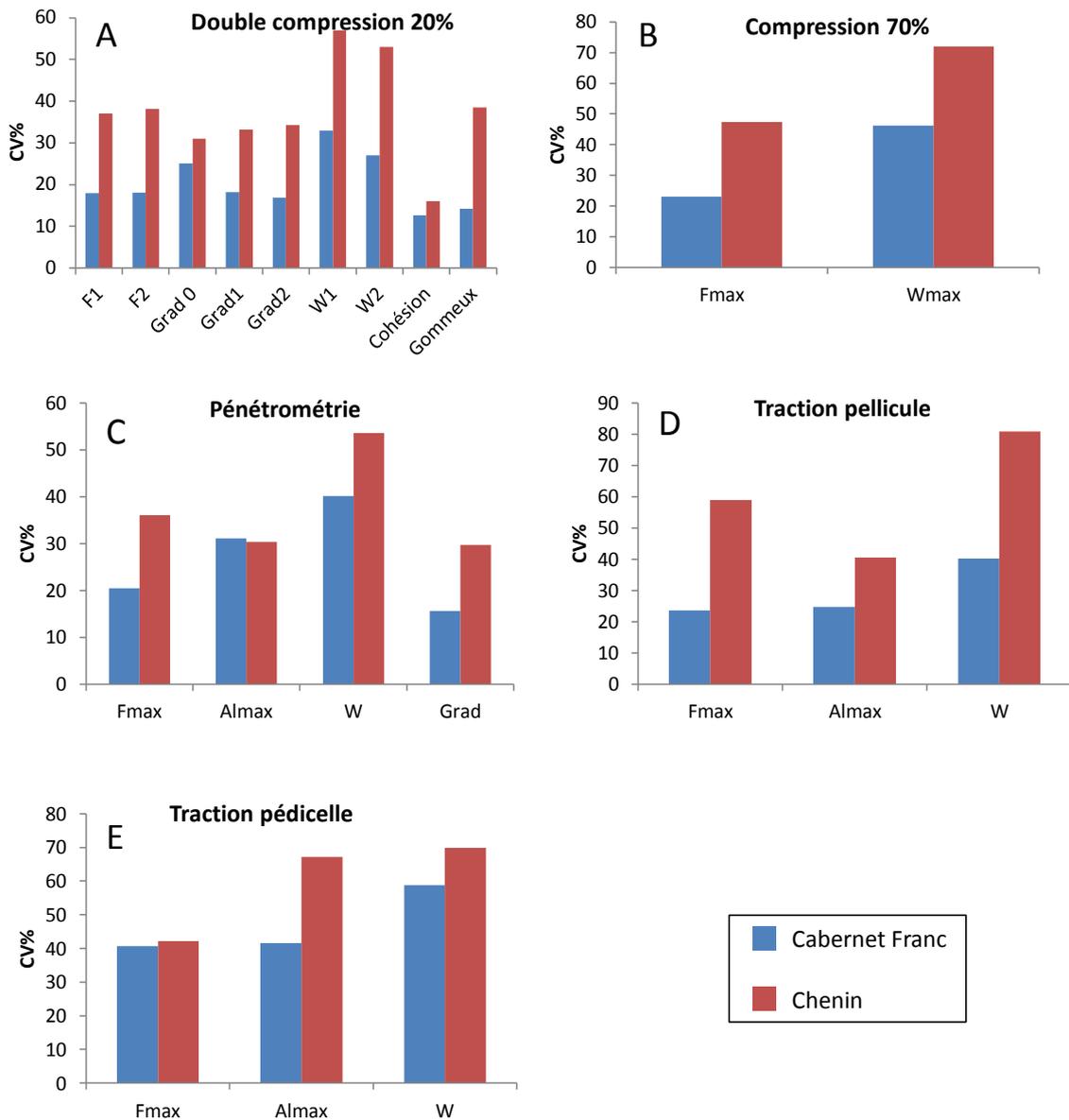


Figure 31. Comparaison des coefficients de variation entre les variétés Chenin et Cabernet Franc pour chacun des paramètres de texture étudié.

## II. Comparaison des propriétés mécaniques sur baie entière

### II.1. La double compression 20%

Parmi les cinq techniques instrumentales de mesure de la texture testées, la double compression 20% est celle dont on extrait le plus de paramètres. Afin de mettre en évidence la capacité des différents paramètres à discriminer les variétés, les parcelles et les dates, le **Tableau 7** montre les probabilités associées aux analyses de variances à deux facteurs

suivant le modèle : paramètre = date + parcelle + date\*parcelle. Pour le Cabernet Franc, tous les paramètres à l'exception de Grad1 et Grad2 différencient les dates de maturité différentes avec une significativité plus forte pour F1, F2, W2 et Gommeux ( $p < 0,001$ ). Seuls les paramètres Grad2, W2, cohésion et gommeux permettent de mettre en évidence un effet parcelle. Aucun des paramètres de double compression n'a montré d'effet significatif pour l'interaction date\*parcelle, ce qui signifie que les propriétés mécaniques des raisins issus des deux parcelles de Cabernet Franc étudiées évoluent de la même manière en fonction de la date.

Pour la variété Chenin, tous les paramètres, excepté W1 et W2 liés à l'énergie de compression de la baie, différencient significativement la date de maturité. De plus, chaque paramètre permet de discriminer significativement les quatre parcelles de Chenin. L'interaction date\*parcelle est également significative pour tous ces paramètres, indiquant que les raisins d'au moins une parcelle ne suivent pas la même évolution en termes de propriétés mécaniques par rapport aux autres. Concernant la discrimination inter-variétale, tous les paramètres de double compression à l'exception de Grad0 (réponse élastique de la baie avant le début de la compression) et W1 permettent de différencier significativement le Cabernet Franc du Chenin.

**Tableau 7. Probabilité associées aux analyses de variance à deux facteurs pour les paramètres de double compression 20%.**

	Cabernet Franc				Chenin			Effet variété p
	Paramètres	Date	Parcelle	Date*Parcelle	Date	Parcelle	Date*Parcelle	
		p	p	p	p	p	p	
Double compression 20%	F1	<0,001	ns	ns	<0,001	<0,001	<0,05	<0,01
	F2	<0,001	ns	ns	<0,001	<0,001	<0,05	<0,01
	Grad0	<0,01	ns	ns	<0,001	<0,05	<0,001	ns
	Grad1	ns	ns	ns	<0,001	<0,01	<0,05	<0,05
	Grad2	ns	<0,05	ns	<0,001	<0,001	<0,05	<0,001
	W1	<0,05	ns	ns	ns	<0,001	<0,001	ns
	W2	<0,001	<0,05	ns	ns	<0,001	<0,01	<0,05
	Cohésion	<0,05	<0,05	ns	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Gommeux	<0,001	<0,01	ns	<0,001	<0,001	ns	<0,001

Significativité avec probabilité  $p \leq 0,001$  ; Significativité avec probabilité  $p \leq 0,01$  ;  
 Significativité avec probabilité  $p \leq 0,05$  ; ns= non significatif.

L'évolution des paramètres de double compression pour les parcelles étudiées est donnée dans le **Tableau 8**. Les valeurs de force à la première et à la deuxième compression :F1 et F2 diminuent significativement en fonction de la date de prélèvement pour toutes les parcelles à l'exception de la parcelle 36 de Chenin, qui ne montre pas de différences significatives d'après le test LSD de Fischer. Par ailleurs, cette même parcelle est la seule qui ne montre aucune évolution significative en fonction de la date quel que soit le paramètre considéré. Les valeurs de F1 en fonction de la date sont très proches pour les parcelles de Cabernet Franc passant de 0,211 N à 0,191 N pour la parcelle 2 et de 0,211 N à 0,192 N pour la parcelle 3 ce qui explique qu'aucun effet intra-variétal significatif n'a été trouvé lors du test LSD de Fisher (**Tableau 7**).

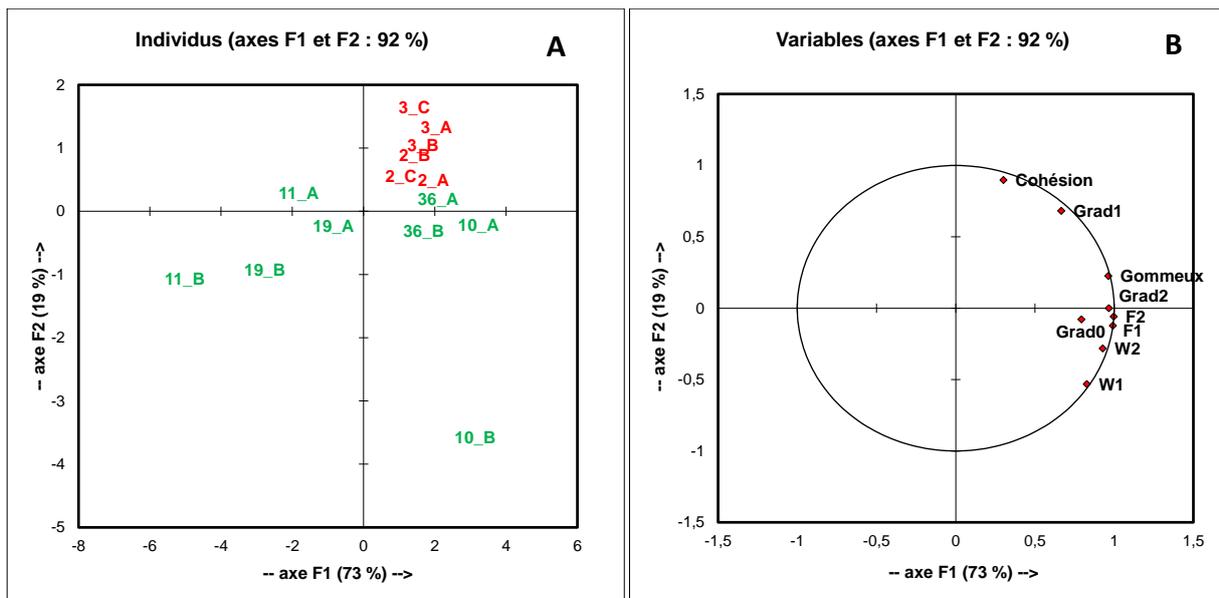
La parcelle 10 de Chenin présente les valeurs de F1 et F2 les plus élevées à la première date de prélèvement laissant supposer qu'elle possède un niveau de maturité texturale moins avancé que les autres parcelles. A l'inverse la parcelle 11 de Chenin présente les valeurs des paramètres liés à la fermeté : F1, F2, W1 et W2, les plus faibles. Aucune évolution significative n'est observée pour le paramètre Grad1 pour les parcelles de Cabernet Franc alors que ce même paramètre diminue significativement pour les parcelles 10, 11 et 19 de Chenin. Le paramètre gommeux diminue significativement pour les parcelles étudiées, avec notamment pour la parcelle 3 de Cabernet Franc une discrimination de chacune de trois dates de prélèvement.

**Tableau 8. Evolution des paramètres de double compression 20% en fin de maturation.**

Variété	Parcelle	Date	F1 (N)	F2 (N)	Grad0 (N/mm)	Grad1 (N/mm)	Grad2 (N/mm)	W1 (mJ)	W2 (mJ)	Cohésion	Gommeux (N)
Cabernet Franc	2	A	0,211 ± 0,003 b	0,194 ± 0,004 b	0,041 ± 0,001 b	0,094 ± 0,003 a	0,201 ± 0,006 a	0,149 ± 0,005 b	0,059 ± 0,002 b	0,033 ± 0,001 a	0,085 ± 0,002 b
	2	B	0,190 ± 0,003 a	0,172 ± 0,004 a	0,036 ± 0,001 a	0,097 ± 0,003 a	0,184 ± 0,006 a	0,125 ± 0,005 a	0,051 ± 0,002 a	0,031 ± 0,001 a	0,078 ± 0,002 a
	2	C	0,191 ± 0,003 a	0,174 ± 0,004 a	0,036 ± 0,001 a	0,095 ± 0,003 a	0,193 ± 0,006 a	0,137 ± 0,005 ab	0,056 ± 0,002 ab	0,031 ± 0,001 a	0,079 ± 0,002 ab
	3	A	0,211 ± 0,006 b	0,194 ± 0,005 b	0,037 ± 0,001 a	0,101 ± 0,003 a	0,177 ± 0,006 a	0,145 ± 0,006a	0,063 ± 0,006 b	0,063 ± 0,002 b	0,092 ± 0,002 c
	3	B	0,189 ± 0,006 a	0,171 ± 0,005 a	0,034 ± 0,001 a	0,092 ± 0,003 a	0,184 ± 0,006 a	0,133 ± 0,006 a	0,055 ± 0,006 a	0,055 ± 0,002 a	0,079 ± 0,002 a
	3	C	0,192 ± 0,006 a	0,176 ± 0,005 a	0,032 ± 0,001 a	0,095 ± 0,003 a	0,186 ± 0,006 a	0,134 ± 0,006 a	0,059 ± 0,006 ab	0,059 ± 0,002 ab	0,085 ± 0,002 b
Chenin	10	A	0,229 ± 0,008 b	0,207 ± ,007 b	0,043 ± 0,002 b	0,105 ± 0,017 b	0,208 ± 0,009 b	0,168 ± 0,008 a	0,064 ± 0,003 a	0,028 ± 0,001 b	0,087 ± 0,004 b
	10	B	0,197 ± 0,008 a	0,173 ± 0,007 a	0,029 ± 0,002 a	0,052 ± 0,017 a	0,167 ± 0,009 a	0,219 ± 0,008 b	0,072 ± 0,003 b	0,019 ± 0,001 a	0,067 ± 0,004 a
	11	A	0,171 ± 0,007 b	0,153 ± 0,007 b	0,035 ± 0,001 a	0,095 ± 0,004 b	0,185 ± 0,009 b	0,099 ± 0,006 a	0,037 ± 0,002 b	0,033 ± 0,001 a	0,064 ± 0,003 b
	11	B	0,126 ± 0,007 a	0,110 ± 0,007 a	0,033 ± 0,001 a	0,070 ± 0,004 a	0,140 ± 0,009 a	0,084 ± 0,006 a	0,029 ± 0,002 a	0,032 ± 0,001 a	0,045 ± 0,003 a
	19	A	0,181 ± 0,006 b	0,160 ± 0,006 b	0,044 ± 0,002 b	0,089 ± 0,006 b	0,177 ± 0,008 a	0,117 ± 0,006 a	0,043 ± 0,002 a	0,033 ± 0,001 a	0,067 ± 0,002 b
	19	B	0,149 ± 0,006 a	0,131 ± 0,006 a	0,036 ± 0,002 a	0,061 ± 0,006 a	0,132 ± 0,008 a	0,105 ± 0,006 a	0,039 ± 0,002 a	0,031 ± 0,001 a	0,056 ± 0,002 a
	36	A	0,194 ± 0,007 a	0,175 ± 0,007 a	0,036 ± 0,002 a	0,092 ± 0,005 a	0,176 ± 0,008 a	0,146 ± 0,007 a	0,058 ± 0,058 a	0,030 ± 0,001 a	0,078 ± 0,003 a
	36	B	0,192 ± 0,007 a	0,173 ± 0,007 a	0,037 ± 0,002 a	0,086 ± 0,005 a	0,174 ± 0,008 a	0,147 ± 0,007 a	0,055 ± 0,002 a	0,028 ± 0,001 a	0,073 ± 0,003 a

**(Moyenne ± erreur standard). Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les dates de prélèvements pour une même parcelle suivant le test de Fisher LSD au seuil de 5%. n=30 à chaque date.**

Les résultats de l'ACP (**Figure 32A**) confirment ceux de l'ANOVA. La composante principale 1 (PC1) explique 73% de la variabilité dans les échantillons et la composante principale 2 (PC2) en explique 19%. Sur la première composante, on observe une répartition des échantillons selon la parcelle et sur la deuxième composante, on observe une répartition selon la variété : Cabernet Franc en haut du plan factoriel et Chenin en bas du plan factoriel. L'analyse des poids factoriels (**Figure 32B**) indique que les variables expliquant la plus grande part de la variance attribuée à la composante PC1 sont les paramètres « F1 », « F2 » et « Grad2 ». Les résultats de l'ACP et de l'ANOVA confirment que la technique de double compression possède des paramètres pertinents capables de différencier significativement des baies de raisins de variétés différentes et dans une moindre mesure, au sein d'une même variété permet de discriminer des degrés de maturité différents notamment par les paramètres liés à la force de compression.



**Figure 32. Analyse en composante principale des paramètres de double compression 20%. (A) Les individus sont identifiés selon le codage suivant : « numéro parcelle\_ date » Les parcelles 2 et 3 (en rouge) sont des parcelles de Cabernet Franc et les parcelles 10, 11, 19 et 36 (en vert) sont des parcelles de Chenin. (B) Variables de double compression.**

## II.2. La compression 70%

Les probabilités associées aux analyses de variance à deux facteurs effectuées sur les paramètres de compression 70% selon le modèle : paramètre = date + parcelle + date \* parcelle, sont montrées dans le **Tableau 9**. L'ANOVA révèle que le paramètre lié à la force de compression maximale, Fmax, permet de discriminer significativement la date et la parcelle pour la variété Chenin ce qui n'est pas le cas pour la variété Cabernet Franc. Pour ce même paramètre l'interaction date \* parcelle est significative à la fois pour le Cabernet Franc ( $p < 0,01$ ) et le Chenin ( $p < 0,001$ ). Le paramètre Wmax est capable de discriminer significativement des stades de maturité différents uniquement pour la variété Chenin, mais permet de discriminer des parcelles pour les deux variétés. Le paramètre Defmax ne montre aucun effet significatifs pour la date, la parcelle, ni l'interaction date \* parcelle pour les deux variétés de raisins étudiées.

L'effet variété permettant de discriminer le Cabernet Franc du Chenin est mis en évidence par les paramètres Fmax et Wmax.

**Tableau 9. Probabilité associées aux analyses de variance à deux facteurs pour les paramètres de compression 70%.**

	Cabernet Franc			Chenin			Effet variété p	
	Paramètres	Date	Parcelle	Date*Parcelle	Date	Parcelle		Date*Parcelle
		p	p	p	p	p		p
Compression 70%	Fmax	ns	ns	<0,01	<0,001	ns	<0,001	<0,01
	Wmax	ns	<0,001	ns	<0,001	<0,001	<0,001	<0,05
	Def max	ns	<0,01	ns	ns	<0,001	<0,001	<0,001

Significativité avec probabilité  $p \leq 0,001$  ; Significativité avec probabilité  $p \leq 0,01$  ; Significativité avec probabilité  $p \leq 0,05$  ; ns= non significatif.

L'évolution des paramètres de compression 70% pour les parcelles étudiées est donnée dans le **Tableau 10**. Pour le Cabernet Franc, seule la parcelle 3 montre une diminution significative des valeurs de Fmax passant de 0,63N à la date A à 0,51N à la date C. On

n'observe pas d'évolution significative des paramètres Wmax et Defmax sur les trois dates de prélèvements étudiées pour les deux parcelles de Cabernet Franc.

Concernant le Chenin, les parcelles 10, 11 et 36 montrent des valeurs significativement décroissantes du paramètre Fmax, alors que pour la parcelle 19 on observe une augmentation des valeurs passant de 0,45 à 0,57 N sur les deux dates étudiées. De même pour le paramètre Wmax toutes les parcelles ne suivent pas la même tendance d'évolution, avec une décroissance des valeurs pour les parcelles 10, 11 et 36 et une augmentation des valeurs pour la parcelle 19. Le paramètre Defmax ne montre pas d'évolution significative de ses valeurs pour les parcelles de Chenin à l'exception de la parcelle 19.

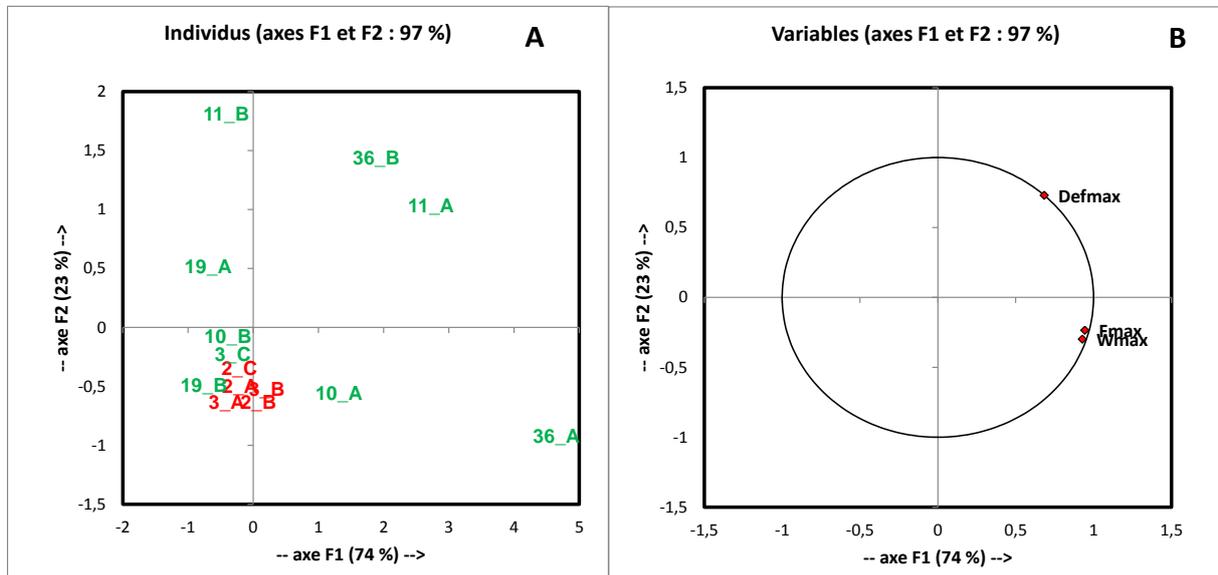
**Tableau 10. Evolution des paramètres de compression 70% en fin de maturation.**

Variété	Parcelle	Date	Fmax	Wmax	Defmax
Cabernet Franc	2	A	0,59 ± 0,03 a	1,90 ± 0,16 a	0,040 ± 0,002 a
	2	B	0,60 ± 0,03 a	1,68 ± 0,16 a	0,037 ± 0,002 a
	2	C	0,65 ± 0,03 a	1,99 ± 0,16 a	0,043 ± 0,002 a
	3	A	0,63 ± 0,03 b	1,42 ± 0,12 a	0,033 ± 0,002 a
	3	B	0,60 ± 0,03 b	1,50 ± 0,12 a	0,035 ± 0,002 a
	3	C	0,51 ± 0,03 a	1,50 ± 0,12 a	0,038 ± 0,002 a
Chenin	10	A	0,49 ± 0,03 b	1,29 ± 0,09 b	0,029 ± 0,002 a
	10	B	0,39 ± 0,03 a	0,94 ± 0,10 a	0,030 ± 0,002 a
	11	A	0,68 ± 0,11 b	1,51 ± 0,10 b	0,062 ± 0,003 a
	11	B	0,30 ± 0,12 a	0,76 7 0,11 a	0,058 ± 0,003 a
	19	A	0,45 ± 0,03 a	1,42 ± 0,18 a	0,054 ± 0,002 b
	19	B	0,57 ± 0,03 b	2,00 ± 0,18 b	0,040 ± 0,002 a
	36	A	0,64 ± 0,03 b	2,47 ± 0,14 b	0,042 ± 0,002 a
	36	B	0,37 ± 0,03 a	1,12 ± 0,14 a	0,047 ± 0,002 a

(Moyenne ± erreur standard). Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les dates de prélèvements pour une même parcelle suivant le test de Fisher LSD au seuil de 5%. n=30 à chaque date.

L'analyse de l'ensemble des données de compression 70% sous forme d'ACP, montre que sur la première composante qui est responsable de 74% de la variabilité, les individus sont séparés en fonction des parcelles et de la variété. Les individus appartenant à la variété Cabernet Franc étant regroupés en bas à gauche du plan factoriel. Sur la deuxième composante responsable de 23% de la variabilité les individus sont séparés en fonction de la date (Figure 33A). L'analyse des poids factoriels (Figure 33 B) indique que les variables

expliquant la plus grande part de la variance attribuée à la composante PC1 sont Fmax et Wmax.



**Figure 33.** Analyse en composante principale des paramètres de compression 70%. (A) Les individus sont identifiés selon le codage suivant : « numéro parcelle\_ date ». Les parcelles 2 et 3 (en rouge) sont des parcelles de Cabernet Franc et les parcelles 10, 11, 19 et 36 (en vert) sont des parcelles de Chenin. (B) Variables de compression 70%.

### III. Evaluation des propriétés mécaniques par des méthodes ciblées

#### III.1. La pénétrométrie

Les valeurs de probabilités associées aux analyses de variances pour les données de pénétrométrie sont représentées dans le Tableau 11. Les résultats montrent que tous les paramètres de pénétrométrie sont capables de discriminer significativement les deux variétés Cabernet Franc et Chenin entre elles avec une probabilité  $p < 0,001$ .

Pour le Cabernet Franc, les effets date et parcelle sont significatifs pour l'ensemble des paramètres de pénétrométrie. Seul le paramètre ALmax montre un effet significatif au seuil

de 5% pour l'interaction date \* parcelle. Ce paramètre correspond à la distance en millimètre parcourue par l'aiguille de pénétrométrie entre le moment où elle touche la baie et le moment où elle la perfore. Il témoigne donc des capacités d'étirement de la pellicule en lien avec son élasticité.

Concernant le Chenin, aucun paramètre n'est capable de discriminer les stades de maturité différents, en revanche tous permettent de discriminer des parcelles différentes. Les interactions date \* parcelle étant significatives pour tous les paramètres cela indique que les raisins d'au moins une parcelle n'évoluent pas dans le même sens que les autres.

**Tableau 11. Probabilité associées aux analyses de variance à deux facteurs pour les paramètres de pénétrométrie.**

	Paramètres	Cabernet Franc			Chenin			Effet variété p
		Date	Parcelle	Date*Parcelle	Date	Parcelle	Date*Parcelle	
		p	p	p	p	p	p	
Pénétrométrie	Fmax	<0,001	<0,001	ns	ns	<0,001	<0,001	<0,001
	ALmax	<0,001	<0,05	<0,05	ns	<0,01	<0,01	<0,001
	Wmax	<0,001	<0,001	ns	ns	<0,001	<0,01	<0,001
	Grad	<0,05	<0,05	ns	ns	<0,001	<0,001	<0,001

**Significativité avec probabilité  $p \leq 0,001$  ; Significativité avec probabilité  $p \leq 0,01$  ; Significativité avec probabilité  $p \leq 0,05$  ; ns= non significatif.**

L'évolution des paramètres de pénétrométrie : Fmax, ALmax, Wmax et Grad en fin de maturation pour les parcelles étudiées est présentée dans le **Tableau 12**. Pour le Cabernet Franc, les valeurs de Fmax sur les trois dates de prélèvements évoluent respectivement pour les parcelles 2 et 3 entre 0,34 et 0,33 ; et 0,36 et 0,39 N. Il est à noter que la valeur de Fmax à la date C est significativement supérieure à celle de la date B pour les deux parcelles. Cette augmentation significative que l'on retrouve pour les deux parcelles peut s'expliquer par le fort épisode pluvieux dans les jours précédant le dernier prélèvement. L'excès d'eau absorbé aurait entraîné une augmentation de la pression de turgescence des cellules les rendant plus fermes. D'ailleurs, pour la mesure de double compression 20%, bien que la différence ne soit pas significative, une même augmentation de la valeur de Fmax en fin de prélèvement avait été trouvée pour les deux parcelles de Cabernet franc (**Tableau 8**). La technique de pénétrométrie serait donc plus sensible aux conditions de pluviométrie. Pour les parcelles de

Chenin les valeurs de Fmax montrent des évolutions différentes sur les deux dates de prélèvements, ainsi alors que les données diminuent pour les parcelles 10 et 11 passant respectivement de 0,26 à 0,22 N et de 0,20 à 0,17 N, la parcelle 19 montre une augmentation de Fmax passant de 0,18 à 0,22 N. Les paramètres ALmax et Wmax évoluent de la même manière, avec des valeurs qui diminuent entre les deux premières dates de prélèvement puis ré-augmentent à la dernière date de prélèvement pour les parcelles de Cabernet Franc. La parcelle 10 de Chenin montre une diminution significative de ces paramètres alors qu'à l'inverse elles augmentent pour la parcelle 19.

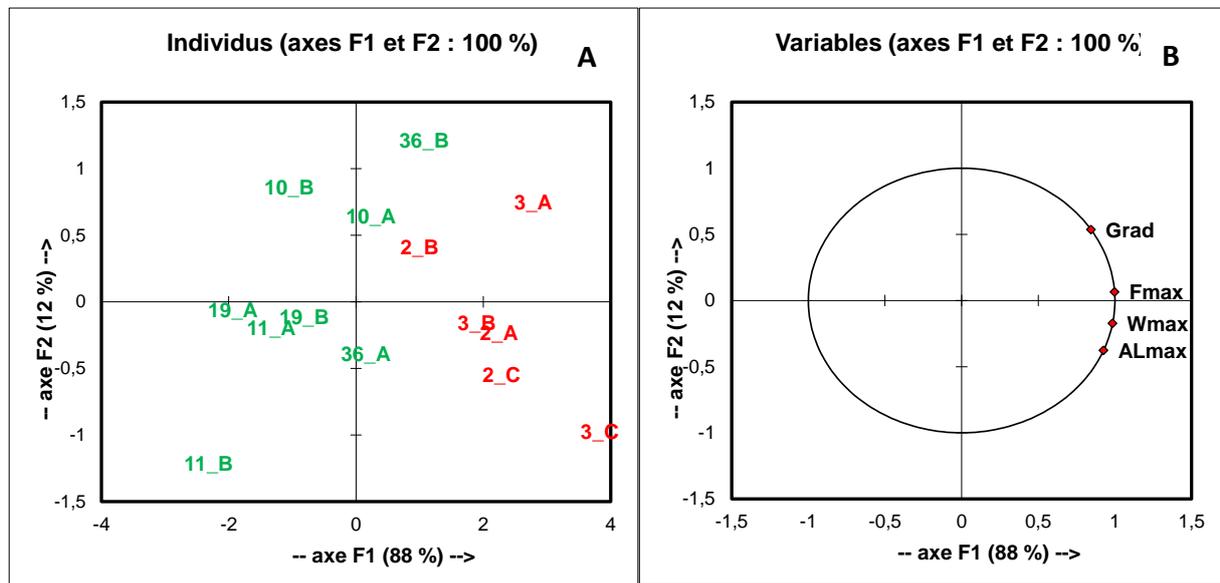
**Tableau 12. Evolution des paramètres de pénétrométrie en fin de maturation.**

Variété	Parcelle	Date	Fmax	ALmax	Wmax	Grad
Cabernet Franc	2	A	0,34 ± 0,01 b	1,19 ± 0,06 b	0,19 ± 0,01 b	0,33 ± 0,01 a
	2	B	0,30 ± 0,01 a	0,98 ± 0,06 a	0,15 ± 0,01 a	0,33 ± 0,01 a
	2	C	0,33 ± 0,01 b	1,23 ± 0,06 b	0,20 ± 0,01 b	0,32 ± 0,01 a
	3	A	0,36 ± 0,01 b	1,12 ± 0,04 a	0,20 ± 0,01 a	0,37 ± 0,01 b
	3	B	0,32 ± 0,01 a	1,13 ± 0,04 a	0,18 ± 0,01 a	0,33 ± 0,01 a
	3	C	0,39 ± 0,01 b	1,43 ± 0,04 b	0,26 ± 0,01 b	0,34 ± 0,01 a
Chenin	10	A	0,26 ± 0,01 b	0,88 ± 0,03 b	0,12 ± 0,01 b	0,32 ± 0,01 a
	10	B	0,22 ± 0,01 a	0,72 ± 0,03 a	0,09 ± 0,01 a	0,30 ± 0,01 a
	11	A	0,20 ± 0,01 b	0,82 ± 0,06 a	0,09 ± 0,01 a	0,26 ± 0,01 b
	11	B	0,17 ± 0,01 a	0,82 ± 0,06 a	0,08 ± 0,01 a	0,20 ± 0,01 a
	19	A	0,18 ± 0,01 a	0,74 ± 0,03 a	0,08 ± 0,01 a	0,26 ± 0,01 a
	19	B	0,22 ± 0,01 b	0,86 ± 0,03 b	0,11 ± 0,01 b	0,28 ± 0,01 a
	36	A	0,26 ± 0,02 a	0,99 ± 0,05 a	0,13 ± 0,01 a	0,29 ± 0,02 a
	36	B	0,30 ± 0,02 a	0,89 ± 0,05 a	0,14 ± 0,01 a	0,36 ± 0,02 b

**(Moyenne ± erreur standard). Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les dates de prélèvements pour une même parcelle suivant le test de Fisher LSD au seuil de 5%. n = 30 à chaque date.**

La Figure 34 montre l'analyse en composante principale pour la technique de pénétrométrie. La composante principale 1 (PC1) explique 88% de la variabilité dans les échantillons et la composante principale 2 (PC2) en explique 12%. Sur la première composante, on observe une répartition des individus selon leur variété : Cabernet franc à droite du plan factoriel et Chenin à gauche du plan factoriel (**Figure 34 A**). L'analyse des poids factoriels (Figure 34 B)

indique que les variables expliquant la plus grande part de la variance attribuée à la composante PC1 sont Fmax et Wmax.



**Figure 34. Analyse en composante principale des paramètres de pénétrométrie. (A) Les individus sont identifiés selon le codage suivant : « numéro parcelle\_ date » Les parcelles 2 et 3 (en rouge) sont des parcelles de Cabernet Franc et les parcelles 10, 11, 19 et 36 (en vert) sont des parcelles de Chenin. (B) Variables de pénétrométrie.**

### III.2. La traction sur pellicule

Le **Tableau 13** montre les probabilités associées aux analyses de variance à deux facteurs effectuées sur l'ensemble des données de traction sur pellicule. Tous les paramètres permettent de discriminer significativement les variétés de Chenin et Cabernet franc entre elles avec une probabilité  $p < 0,001$ . Seul le paramètre ALmax est capable de discriminer significativement la date de prélèvement pour la variété Cabernet Franc contre aucun paramètre pour la variété Chenin. Ici le paramètre ALmax correspond à la distance en millimètre d'étirement de la pellicule pendant la traction avant qu'elle ne se déchire. Bien que la définition soit différente du paramètre ALmax de pénétrométrie, tous deux témoignent de la capacité d'étirement de la pellicule en lien avec son élasticité. Dans les deux techniques, l'élasticité de la baie montre une évolution significative en fonction de la date.

Tous les paramètres de traction sur pellicule permettent de différencier les parcelles de Chenin avec une probabilité  $p < 0,001$  alors que pour la variété Cabernet Franc seuls les paramètres  $F_{max}$  et  $W_{max}$  permettent de différencier significativement les parcelles. L'interaction date \* parcelle pour tous ces paramètres n'est pas significative, quelle que soit la variété considérée.

**Tableau 13. Probabilité associées aux analyses de variance à deux facteurs pour les paramètres de traction sur pellicule.**

	Cabernet Franc			Chenin			Effet variété p	
	Paramètres	Date	Parcelle	Date*Parcelle	Date	Parcelle		Date*Parcelle
		p	p	p	p	p		p
Traction pellicule	$F_{max}$	ns	<0,05	ns	ns	<0,001	ns	<0,001
	$AL_{max}$	<0,001	ns	ns	ns	<0,001	ns	<0,001
	$W_{max}$	ns	<0,01	ns	ns	<0,001	ns	<0,001

Significativité avec probabilité  $p \leq 0,001$  ; Significativité avec probabilité  $p \leq 0,01$  ;  
 Significativité avec probabilité  $p \leq 0,05$  ; ns= non significatif.

L'évolution des paramètres de traction sur pellicule :  $F_{max}$ ,  $AL_{max}$  et  $W_{max}$  en fin de maturation et pour chaque parcelle, est présentée dans le

**Tableau 14.** Une tendance à la diminution des valeurs du paramètre  $F_{max}$  pour les parcelles de la variété Cabernet Franc est observée, cependant cette diminution n'est pas statistiquement significative. De même aucune évolution significative de  $F_{max}$  n'est observée pour les 4 parcelles de Chenin. A la première date de prélèvement c'est la parcelle 3 de Cabernet Franc montre la valeur de  $F_{max}$  la plus élevée ( $F_{max} = 2,31$  N). La parcelle 11 de Chenin quant à elle présente la valeur la plus faible de  $F_{max}$  ( $F_{max} = 0,59$  N). Le paramètre  $W_{max}$  ne montre pas d'évolution significative en fonction de la date de prélèvement quel que soit la parcelle considérée. Mais à l'instar du paramètre  $F_{max}$ , les valeurs obtenues pour les parcelles de Cabernet Franc sont plus élevées que celles obtenus pour les parcelles de Chenin. Les pellicules de Cabernet Franc semblent donc plus résistantes à la déchirure que les pellicules de Chenin.

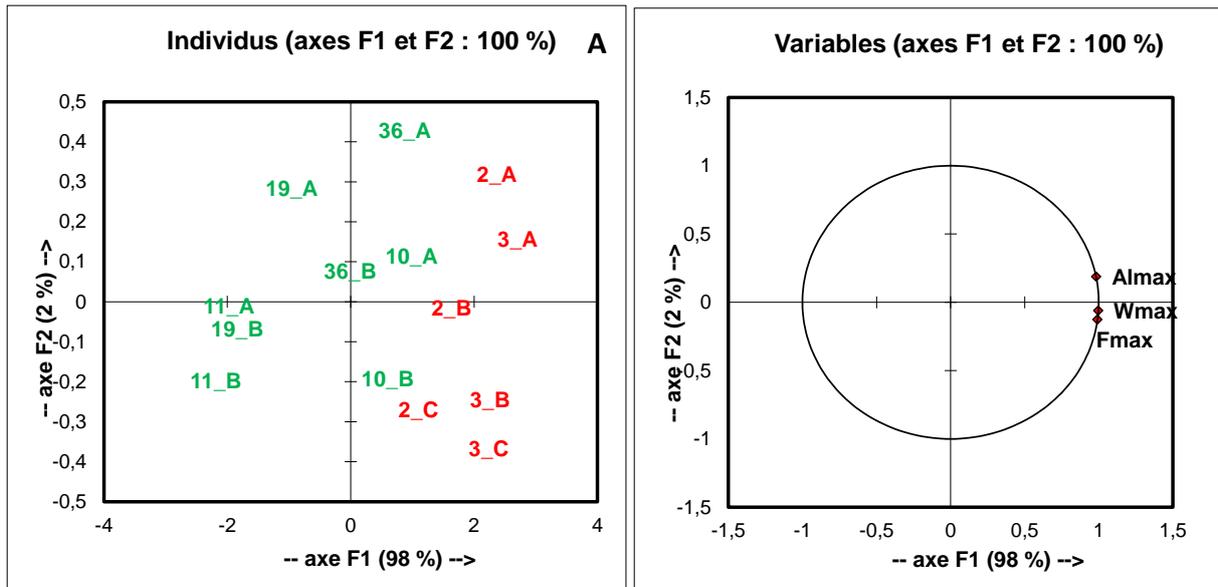
Le paramètre  $AL_{max}$  est le seul à montrer une évolution significative des valeurs, passant de 5,73 à 4,46 mm et 5,97 à 5,06 mm respectivement pour les parcelles 2 et 3 de Cabernet Franc.

**Tableau 14. Evolution des paramètres de traction sur pellicule en fin de maturation.**

Variété	Parcelle	Date	Fmax	ALmax	Wmax
Cabernet Franc	2	A	2,08 ± 0,10 a	5,73 ± 0,25 b	6,66 ± 0,50 a
	2	B	1,96 ± 0,10 a	5,00 ± 0,25 ab	5,77 ± 0,50 a
	2	C	1,86 ± 0,10 a	4,46 ± 0,25 a	5,17 ± 0,50 a
	3	A	2,31 ± 0,13 a	5,97 ± 0,25 b	7,80 ± 0,62 a
	3	B	2,24 ± 0,13 a	5,18 ± 0,26 ab	6,79 ± 0,63 a
	3	C	2,27 ± 0,13 a	5,06 ± 0,25 a	6,87 ± 0,62 a
Chenin	10	A	1,67 ± 0,11 a	4,67 ± 0,26 a	4,60 ± 0,43 a
	10	B	1,83 ± 0,11 a	4,64 ± 0,26 a	4,96 ± 0,44 a
	11	A	0,59 ± 0,07 a	2,70 ± 0,16 a	1,10 ± 0,17 a
	11	B	0,58 ± 0,07 a	2,41 ± 0,17 a	0,93 ± 0,17 a
	19	A	0,91 ± 0,12 a	3,61 ± 0,31 a	1,97 ± 0,21 a
	19	B	0,78 ± 0,12 a	3,74 ± 0,31 a	1,38 ± 0,21 a
	36	A	1,52 ± 0,13 a	4,73 ± 0,17 a	4,30 ± 0,18 a
	36	B	1,38 ± 0,13 a	4,51 ± 0,17 a	3,93 ± 0,18 a

(Moyenne ± erreur standard). Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les dates de prélèvements pour une même parcelle suivant le test de Fisher LSD au seuil de 5%. n=30 à chaque date.

Les résultats de l'ACP effectuée sur les données de traction sur pellicule sont montrés sur la **Figure 35A**. Les échantillons sont répartis selon la variété sur la composante principale 1, qui explique 98% de la variabilité observée. Les individus issus de la variété Chenin étant à gauche du plan factoriel, et ceux issus de la variété Cabernet Franc étant à droite. Sur ce même axe, les individus sont séparés en fonction de la parcelle d'origine ce qui confirme les résultats précédents obtenus par l'ANOVA. L'analyse des poids factoriels **Figure 35B** indique que les variables expliquant la plus grande part de la variance observée de la composante PC1 sont Fmax et Wmax.



**Figure 35.** Analyse en composante principale des paramètres de traction sur pellicule. (A) Les individus sont identifiés selon le codage suivant : « numéro parcelle\_date » Les parcelles 2 et 3 (en rouge) sont des parcelles de Cabernet Franc et les parcelles 10, 11, 19 et 36 (en vert) sont des parcelles de Chenin. (B) Variables de traction sur pellicule.

### III.3. La traction sur pédicelle

Les résultats de l'ANOVA effectuées sur les données de traction sur pédicelle sont donnés **Tableau 15**. Aucun des 3 paramètres issus de cette technique n'est capable de discriminer significativement les deux variétés Chenin et Cabernet Franc entre elles.

Pour la variété Cabernet Franc les paramètres ALmax et Wmax permettent une différenciation des stades de maturité avec une probabilité  $p < 0,05$ . En revanche aucun paramètre ne met en évidence l'effet date pour la variété Chenin.

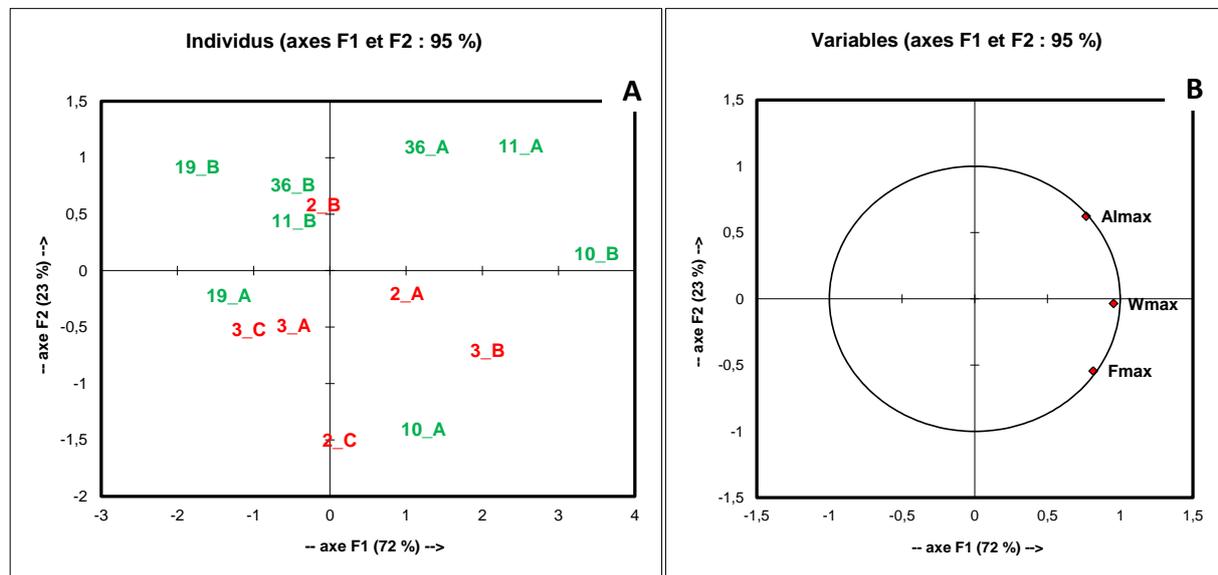
L'effet parcelle est significatif pour la variété Chenin avec les paramètres Fmax ( $p < 0,001$ ) et Wmax ( $p < 0,001$ ).

**Tableau 15. Probabilité associées aux analyses de variance à deux facteurs pour les paramètres de traction sur pédicelle.**

	Cabernet Franc						Chenin		Effet variété p
	Paramètres	Date	Parcelle	Date*Parcelle	Date	Parcelle	Date*Parcelle		
		p	p	p	p	p	p		
Traction pédicelle	Fmax	ns	ns	<0.05	ns	<0.001	ns	ns	
	ALmax	<0.05	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
	Wmax	<0.05	ns	ns	ns	<0.001	ns	ns	

**Significativité avec probabilité  $p <= 0,001$  ; Significativité avec probabilité  $p <= 0,05$  ; ns= non significatif.**

Les résultats de l'ACP effectuée sur les données de traction sur pédicelle sont montrés **Figure 36A**. Il n'y a pas de répartition nette des individus sur les deux premiers axes de la composante principale qui expliquent respectivement 72 et 23% de la variabilité. L'analyse des poids factoriels **Figure 36B** indique que la variable expliquant la plus grande part de la variance observée de la composante PC1 est Wmax.



**Figure 36. Analyse en composante principale des paramètres de traction sur pédicelle. (A) Les individus sont identifiés selon le codage suivant : « numéro parcelle\_ date » Les parcelles 2 et 3 (en rouge) sont des parcelles de Cabernet Franc et les parcelles 10, 11, 19 et 36(en vert) sont des parcelles de Chenin. (B) Variables de traction sur pédicelle.**

## IV. Discussion

Nous avons comparé l'évolution des propriétés mécaniques des baies de Cabernet Franc et Chenin en fin de maturation du millésime 2010, par cinq méthodes instrumentales de mesure de la texture.

D'après l'ensemble des résultats, le paramètre  $F_{max}$  s'avère être un bon critère de comparaison entre les deux variétés. Le **Tableau 16** montre les valeurs moyennes  $F_{max}$  obtenues en réunissant l'ensemble des parcelles et les dates de prélèvement d'une même variété. La comparaison des résultats a montré des différences significatives en termes de propriétés mécaniques entre ces deux variétés de raisin blanc et rouge. Pour la traction sur pellicule les valeurs sont :  $F_{max}(N) = 1,95$  et  $1,18$  respectivement pour le Cabernet Franc et le Chenin avec une significativité  $p < 0,001$ . Pour la pénétrométrie, les valeurs de  $F_{max}(N) = 0,338$  et  $0,228$  montrent une différence significative ( $p < 0,001$ ) entre le Cabernet Franc et le Chenin. D'après les résultats des valeurs  $F_{max}$  extraites des mesures de pénétrométrie et de la traction de la pellicule, il en ressort que les raisins de la variété Cabernet Franc possèdent des baies dont les pellicules sont plus résistantes que celles issues du Chenin. Ce résultat est appuyé par le fait que les jours précédents la dernière date de prélèvement, date C, un fort épisode pluvieux a eu lieu dans la région à tel point que l'ensemble des raisins prélevés dans les parcelles de Chenin étaient difficilement exploitables. Les pellicules des baies issues de la variété Chenin étaient complètement fissurées ce qui n'a pas permis de réaliser les analyses de textures sur baie entière ou localisées sur ces raisins. En revanche dans les mêmes conditions, les raisins de Cabernet Franc ne présentaient pas de fissures dans leurs pellicules.

**Tableau 16. Comparaison du paramètre  $F_{max}$  entre les variétés Cabernet Franc et Chenin.**

		Pénétrométrie	Traction pellicule	Double Compression 20%	Compression 70%	Traction pédicelle
Valeur moyenne $F_{max}$ (N)	Cabernet Franc	0,338±0,005	1,95±0,05	2,59±0,05	7,84±0,18	1,49±0,04
	Chenin	0,228±0,005	1,18±0,04	2,38±0,04	5,96±0,15	1,46±0,04
	Significativité	***	***	*	***	ns

Significativité  $p < 0.05$  (\*);  $p < 0.001$  (\*\*\*) ; ns: non significatif. (Moyenne ± erreur standard).

Au niveau de la discrimination inter-variétal, seule la technique de traction sur pédicelle ne présente aucun paramètre capable de différencier significativement les baies issues des variétés Cabernet Franc et Chenin. Les techniques sur baie entière, telles que la compression 20% et compression 70%, ont des paramètres significatifs pour discriminer les deux variétés. Le paramètre de double compression 20% lié à la fermeté de la baie, ainsi que le paramètre Gommeux ont déjà été décrits comme des facteurs de discrimination variétale par Letaief et al (2008a) et Rio Segade et al (2011a). D'après nos résultats, les techniques plus ciblées sur la pellicule (pénétrométrie et traction sur pellicule) semblent plus efficaces pour différencier les deux variétés de Chenin et Cabernet Franc. En effet tous leurs paramètres permettent de mettre en évidence un effet variété avec une probabilité  $p < 0,001$ . Rio Segade et al (2008) ont déjà mis en évidence dans leurs travaux, les capacités de discrimination inter-variétale des paramètres liés à la texture de la pellicule des raisins, ils ont ainsi pu différencier 13 variétés de raisin rouges. De même dans leurs travaux Letaief et al (2008a) ont montré que le paramètre BH (Berry Hardness), qui est l'équivalent ici de  $F_{max}$ , permettait de différencier plusieurs variétés de raisins rouges Italiens comme les variétés Barbera, Brachetto, Nebbiolo, Pinot Noir ou encore le Cabernet Sauvignon.

Au niveau de la discrimination intra-variétal, chacune des techniques testées possède au moins un paramètre capable de discriminer des parcelles différentes appartenant à la même variété, sauf pour la traction sur pédicelle avec la variété Cabernet Franc. De plus, cette capacité de discrimination semble plus efficace sur les parcelles issues de la variété Chenin. Cependant, ce résultat ne peut être affirmé de façon catégorique étant donné que seulement 2 parcelles de Cabernet Franc ont été comparées, contre 4 pour la variété Chenin. Nos résultats confirment cependant ceux obtenus lors des précédents travaux sur un plus grand nombre de parcelles, où la capacité de différenciation de parcelles issus de types de sols et de localisations différentes a été établie par double compression 20% et pénétrométrie (Le Moigne et al, 2008 ; Maury et al 2009 ; Zouid et al 2010).

Au niveau de la discrimination inter-dates, les mesures instrumentales de texture relatives à la pellicule, telles que la pénétrométrie et la traction sur pellicule possèdent au moins un paramètre capable de différencier des dates de maturation chez la variété Cabernet Franc, mais pas pour la variété Chenin. Les techniques sur baie entière, telles que la double compression 20% et la compression 70%, montrent des paramètres intéressants pour le suivi

de maturité texturale. En effet la double compression 20% possède 7 paramètres permettant de discriminer significativement la date à la fois pour le Cabernet Franc et le Chenin. La discrimination inter-date de la compression 70% semble plus efficace sur la variété Chenin que sur la variété Cabernet franc. Dans la littérature, peu de différences mécaniques ont été observées tout au long de la maturation par double compression entre les dates de prélèvements (Robin et al, 1997 ; Le Moigne, 2008 ; Maury et al, 2009). Zouid (2011) qui a travaillé sur les propriétés mécaniques des raisins Cabernet Franc par double compression a montré cependant une tendance à la diminution des paramètres en fin de maturation.

## V. Conclusion

D'après la littérature et les résultats obtenus lors de cette étude, les méthodes instrumentales d'analyse des propriétés mécaniques sont pertinentes pour discriminer l'origine, la variété ou le degré de maturité des raisins. Parmi les mesures instrumentales utilisées, les techniques de double compression 20% et de pénétrométrie semblent être les plus efficaces pour différencier la date de prélèvement et la parcelle d'origine. Ces deux techniques étaient déjà utilisées au laboratoire GRAPPE et n'ont pas nécessité d'optimisation. A l'inverse, les méthodes de traction sur pédicelle et sur pellicule ainsi que la compression 70% n'ont pas, ou peu, auparavant été utilisées au laboratoire GRAPPE notamment pour le Chenin, les résultats obtenus par ces méthodes sont donc des résultats préliminaires sur les variétés Chenin et Cabernet Franc. Cependant pour ces 3 méthodes, les capacités de discrimination inter-variétales, intra-variétales et inter-dates étaient moins importantes que pour les méthodes de pénétrométrie et double compression 20%. Cette étude a pu démontrer que les propriétés mécaniques des variétés blanches et rouges de raisin de cuve étaient significativement différentes. Les pellicules de Cabernet Franc sont plus résistantes que les pellicules de Chenin. Une des applications de ces résultats pourrait être l'étude du lien entre la différence de sensibilité aux maladies cryptogamiques des raisins et les propriétés mécaniques en fonction de la variété.

Après l'analyse de ces résultats et indépendamment du choix de la variété, il est ressorti que les techniques de double compression 20% et de pénétrométrie présentent le meilleur

compromis entre les trois niveaux de discrimination. Cependant, le choix final de la technique à utiliser pour la suite de nos travaux se porte sur la technique de double compression 20% car à l'inverse de la pénétrométrie, elle permet une discrimination inter-date à la fois pour les baies issues de Cabernet Franc et de Chenin. C'est aussi une technique qui prend en compte la baie dans sa globalité en tenant compte à la fois de l'impact de la pellicule et de la pulpe sur les propriétés mécaniques. De plus elles possèdent l'avantage non négligeable d'être une méthode partiellement destructive, laissant la possibilité d'analyses complémentaires effectuées sur les mêmes baies après les mesures de texture. La variété Cabernet Franc sera la variété de raisin choisie pour la suite de nos travaux car la pellicule de cette variété semble moins sensible aux conditions de pluviométrie, ce qui nous évite un risque de matériel végétal inexploitable en cas de fortes de conditions climatiques défavorables.

Les perspectives de ce travail seront par la suite, de mieux comprendre l'origine de ces évolutions et les phénomènes responsables de la variation des propriétés mécaniques pendant la maturation. Pour cela, le chapitre suivant s'intéresse aux propriétés mécaniques des baies en tenant compte des différences physiques et physiologiques existant entre les différents fruits d'un lot.

## Chapitre 2 : Hétérogénéité physique et physiologique au sein d'une grappe de raisin de Cabernet Franc et impact sur les propriétés mécaniques durant la maturation.

A l'issu des résultats présentés dans le premier chapitre, ce deuxième chapitre a pour objectif d'étudier l'hétérogénéité texturale de grappes entières de Cabernet Franc tout au long de la maturation mesurée par une approche baie à baie, en utilisant la technique de double compression 20%. Les données récoltées sont issues du millésime 2011. Les corrélations entre les variables mécaniques et les principaux paramètres physiques et physiologiques fournissent une information pour développer des modèles et formaliser le protocole de prélèvement pour mesurer la maturité texturale.

Une première partie s'intéresse aux changements des propriétés mécaniques des baies tout au long de la maturation.

Une deuxième partie s'intéresse aux évolutions des principaux paramètres physiques et physiologiques issues des mêmes baies pour lesquelles les mesures des propriétés mécaniques ont été réalisées.

Une troisième partie permettra de mettre en évidence les liens observés entre l'évolution des paramètres de texture et les principaux paramètres physiques et physiologiques.

## I. Evolution des propriétés mécaniques des baies de raisin au cours de la maturation.

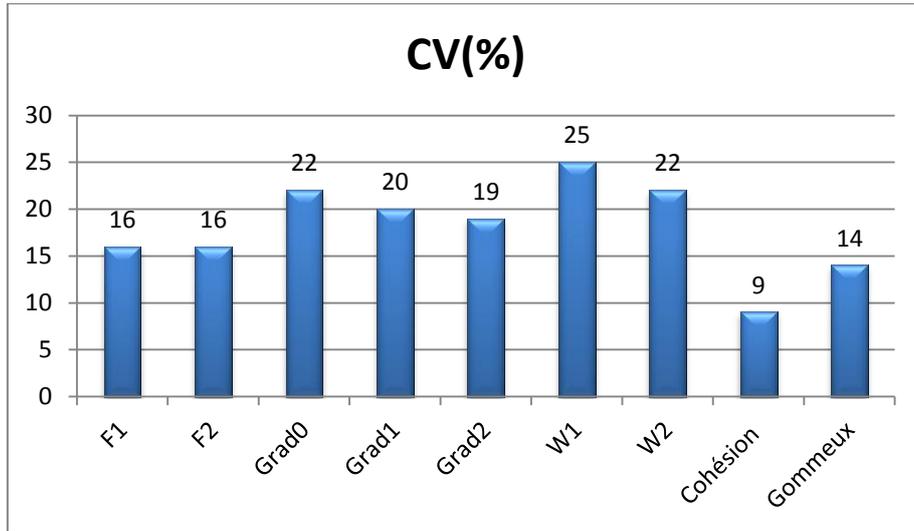
L'analyse des propriétés mécaniques de baies de raisins de Cabernet Franc par mesure de double compression 20% est réalisée au cours du millésime 2011. Le protocole d'échantillonnage a été adapté pour réaliser l'analyse de l'ensemble des baies issues d'une grappe entière. Pour chaque date de prélèvement pendant la maturation, 3 grappes sont récoltées, chacune issue de 3 ceps de même vigueur (1 grappe par cep). Après avoir mesuré de manière globale la variabilité des échantillons étudiés, des analyses descriptives permettent de mettre en évidence l'évolution des paramètres de double compression au cours de la maturation.

### I.1. Mesure de la variabilité des paramètres de double compression

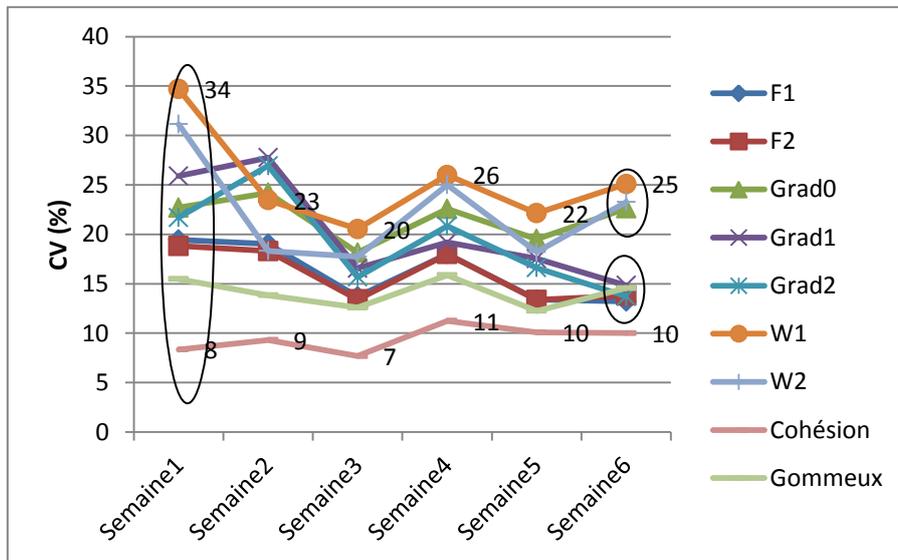
Une représentation de la variabilité des paramètres de double compression évaluée indépendamment de la date de prélèvement est montrée Figure 37. Les paramètres les plus variables sont les paramètres W1 et W2 associés à l'énergie de compression (CV= 33% et 26% respectivement). Les paramètres cohésion et Gommeux sont les paramètres ayant les coefficients de variation les plus faibles.

Afin de voir l'évolution de la variabilité au cours de la maturation, le coefficient de variation de chacun des paramètres de double compression a été calculé pour toutes les semaines de prélèvements (**Figure 38**). On remarque que pour un paramètre donné, le coefficient de variation est plus élevé lors de la première semaine de prélèvement qui est une période proche de la véraison. A partir de la deuxième semaine de prélèvement les coefficients de variations restent élevés mais relativement constants, indiquant seulement des changements mineurs de variabilité d'une semaine à l'autre. A titre d'exemple le paramètre W1 lié à l'énergie de compression de la baie a un CV = 35% lors de la première semaine de prélèvement puis se stabilise entre 20 et 26% pour le reste de la maturation. Seul le paramètre cohésion montre une variabilité quasiment constante du début à la fin de la période de prélèvement avec des valeurs de CV comprises entre 7 et 11%. On peut remarquer également que les paramètres de doubles compression ont une plus forte disparité de CV en début de maturation alors qu'en fin de maturation beaucoup de

paramètres se regroupent autour de valeurs de CV proches de 15% (F1, F2, Grad1, Grad2, Gommeux) ou 25% (W1, W2, Grad0) comment l'indiquent les ellipses de la **Figure 38**.



**Figure 37. Coefficient de variation (CV%) sur l'ensemble des paramètres de texture en 2011.**



**Figure 38. Evolution des coefficients de variation au cours de la maturation.**

Ces premiers résultats mettent en évidence une hétérogénéité non négligeable des propriétés mécaniques au cours de la maturation. Les coefficients de variations observés bien qu'élevés, sont peu surprenant étant donné l'hétérogénéité préalable existant pour chacune des baies au moment de la véraison. De plus, les valeurs des coefficients de

variation restent similaires à celles trouvées dans la littérature pour le raisin de variété Cabernet Franc, études qui n'utilisaient pas un protocole d'échantillonnage par grappe entière, mais un protocole d'échantillonnage global à la parcelle (Maury et al, 2009 ; Zouid et al 2010).

Le calcul des coefficients de Pearson entre chaque paire de variables est montré dans le Tableau. Les paramètres liés à la première et à la deuxième compression sont fortement corrélés entre eux. Ainsi pour les paramètres liés à la force de compression F1 et F2,  $r = 1,00$ . Les paramètres liés à l'énergie de compression W1 et W2 sont également fortement corrélés entre eux ( $r = 0,87$ ), de même pour Grad1 et Grad2 ( $r = 0,96$ ). Ces fortes corrélations nous permettent de sélectionner les variables les plus pertinentes. Ainsi dans un objectif de réduire les données à des variables non redondantes, seuls les paramètres liés à la première compression (F1, W1, Grad0 et Grad1) et les paramètres secondaires (cohésion et gommeux) seront utilisés dans le reste de ce travail.

**Tableau 17. Coefficient de corrélation de Pearson entre les paramètres de double compression à la récolte (n = 349).**

**Les données sont issues des baies récoltées à la dernière date de prélèvement.**

Paramètres	F1	F2	Grad0	Grad1	Grad2	W1	W2	Cohésion	Gommeux
F1	-								
F2	1,00	-							
Grad0	0,62	0,62	-						
Grad1	0,67	0,65	0,30	-					
Grad2	0,87	0,86	0,49	0,87	-				
W1	0,90	0,89	0,59	0,34	0,64	-			
W2	0,85	0,86	0,48	0,28	0,54	0,96	-		
Cohésion	-0,58	-0,55	-0,65	-0,23	-0,54	-0,61	-0,40	-	
Gommeux	0,85	0,87	0,36	0,63	0,69	0,71	0,81	-0,10	-

## I.2. Evolution de la texture au cours de la maturation.

La mise en évidence des effets liés à la date de prélèvement sur l'évolution des propriétés mécaniques des baies a été faite par une analyse de variance ANOVA à un facteur. Le **Tableau 18** présente les valeurs de Fischer et les probabilités associées à l'analyse de

variance. L'effet date est significatif pour tous les paramètres de double compression au seuil de 99% témoignant de changements significatifs des paramètres de texture du raisin au cours de la maturation.

**Tableau 18. Analyse de variance en fonction de la date pour les paramètres de double compression en 2011**

Effet date		
Paramètre	F-ratio	P
F1	120,02	<0,001
F2	117,75	<0,001
Grad0	159,16	<0,001
Grad1	46,15	<0,001
Grad2	51,68	<0,001
W1	126,24	<0,001
W2	91,33	<0,001
Cohésion	101,9	<0,001
Gommeux	70,42	<0,001

Dans le but de savoir quand et comment ces changements de texture ont lieu, les valeurs moyennes des paramètres de double compression ont été analysées pour chaque date de prélèvement. Cette évolution au cours de la maturation est représentée par la **Figure 39**. Les paramètres F1 et W1 liés à la fermeté de la baie suivent une courbe de décroissance sigmoïde. En effet, après une forte diminution entre les deux premières dates de prélèvement, F1 et W1 atteignent un plateau à mi-maturation avec des valeurs respectivement proches de 2,9 N et 2,0 mJ, avant de décroître significativement jusqu'en fin de maturation (**Figure 39A** et **Figure 39B**). A maturité la perte de fermeté observée est respectivement d'environ 38% et 37% pour F1 et W1 par rapport au début de la maturation. Le paramètre Grad0 montre une diminution passant de 0,71 N/mm en début de maturation à 0,39 N/mm en fin de maturation soit une diminution de 45% (**Figure 39C**). Le paramètre Grad1 (**Figure 39E**) diminue fortement en début de maturation puis cette baisse se poursuit progressivement, alors que le paramètre Gommeux subit une forte baisse quasiment linéairement sur toute la période de maturation.

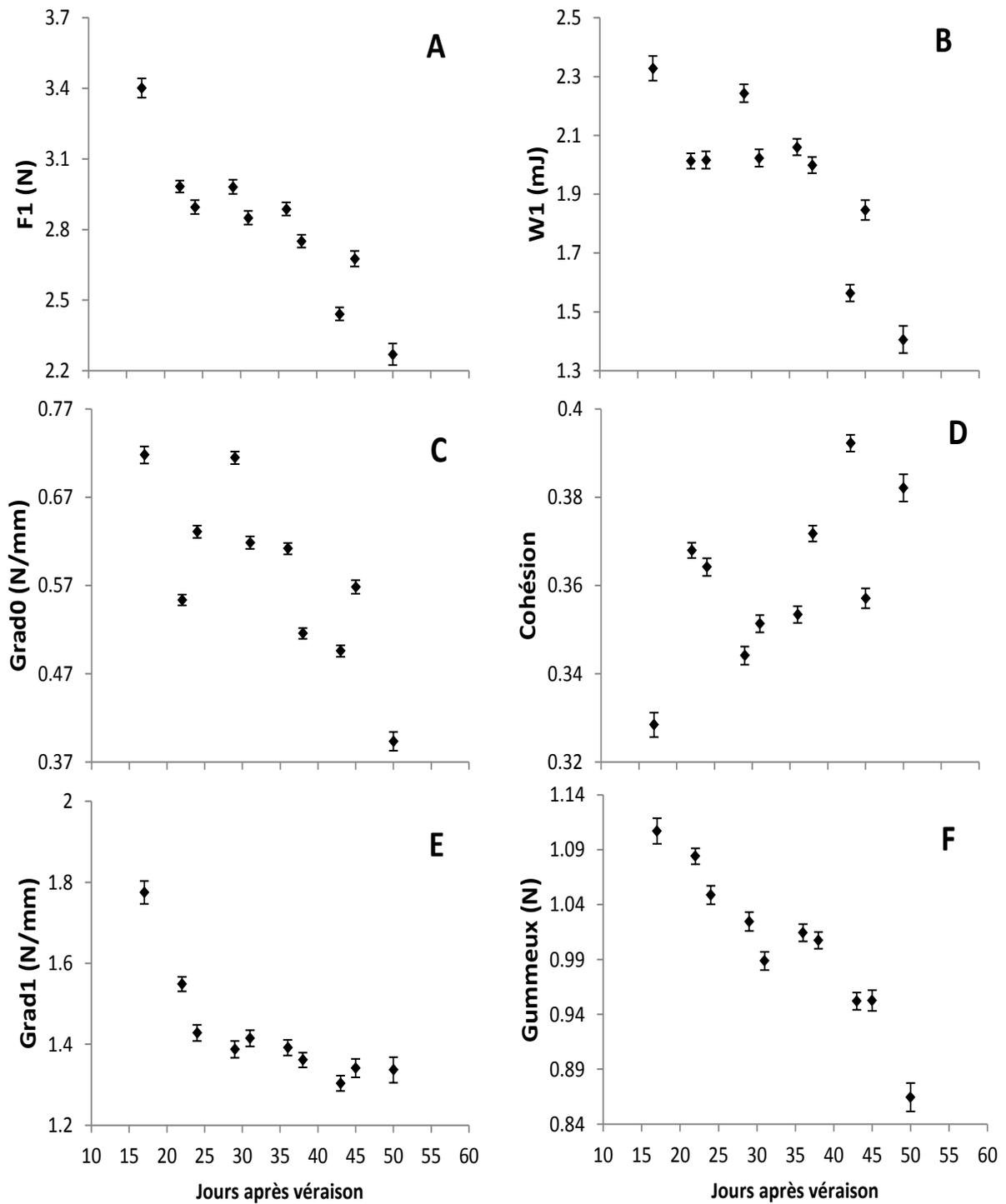
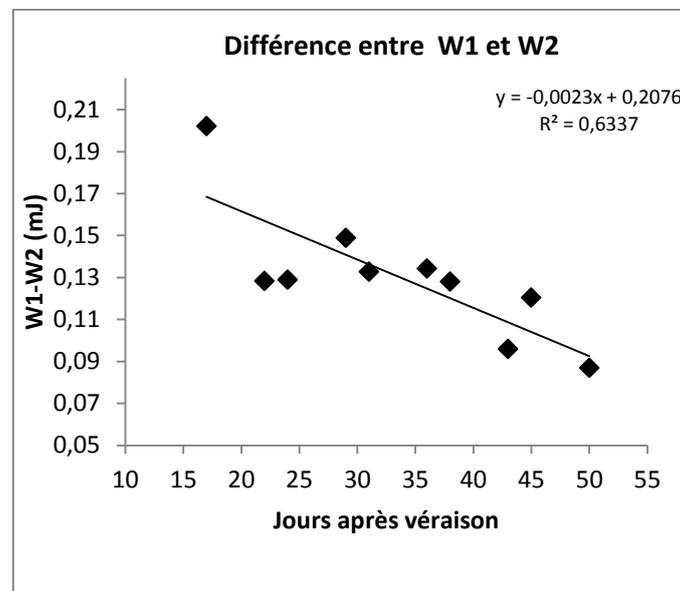


Figure 39. Evolution des paramètres de double compression 20% au cours de la maturation du millésime 2011 (moyenne ; erreur standard), Les moyennes sont issues de l'analyse des baies issues de 3 grappes différentes, A : F1 (N); B : W1 (mJ) ; C : Grad0 (N/mm) ; D : Grad1 (N/mm) ; E : Grad1 (N/mm) ; F : Gommeux (N).

Le paramètre cohésion est le seul à montrer une augmentation significative des valeurs tout au long de la maturation (**Figure 39D**). Il est lié à la désagrégation des tissus après la compression. Plus les valeurs sont proches de 0, plus les parois des cellules de la baie sont affectées par la première compression (Bourne, 2002). Ainsi l'augmentation constatée de ce paramètre indiquerait une meilleure élasticité des parois au cours de la maturation. On sait que la cohésion est le rapport en W2 et W1, toujours avec  $W1 > W2$ . Or l'écart entre les valeurs a tendance à diminuer au cours du temps comme en témoigne le graphique **Figure 40**. Ainsi bien que la baie ne retrouve pas entièrement son état initial après la première compression, elle tend vers un état de plus en plus élastique au cours de la maturation.



**Figure 40.** Différences observées entre les valeurs moyennes de W1 et W2 au cours de la maturation.

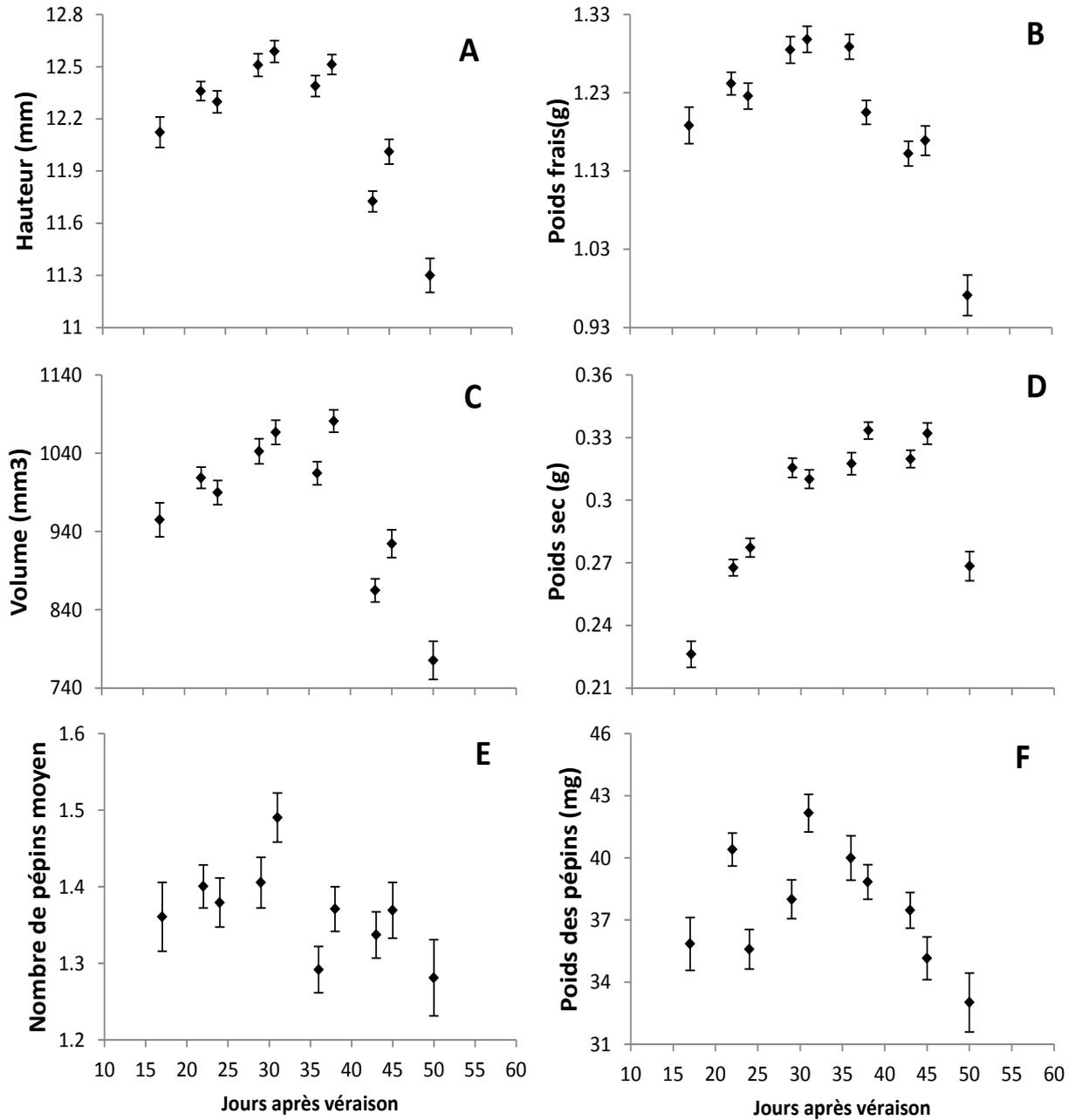
## II. Evolution des principaux paramètres physiques et physiologiques au cours de la maturation.

La connaissance et la compréhension de l'hétérogénéité des propriétés mécaniques au sein d'une grappe de raisin, passe par la connaissance de l'hétérogénéité des principaux facteurs

physiques et physiologiques des baies. C'est pourquoi, les baies ayant servies à la mesure des paramètres de double compression, ont servi à la détermination de paramètres physiques descriptifs tels que : le poids frais, le poids sec, la taille, le volume, le nombre et le poids en pépins de chaque baie, et des paramètres physiologiques tels que : la quantité d'eau, le pourcentage d'eau, le °Brix et enfin la densité.

Les valeurs moyennes des paramètres physiques mesurées sur l'ensemble des baies issues de grappes entières sont représentées **Figure 41**. Les paramètres liés à la taille de la baie (hauteur, poids frais et volume de la baie) augmentent de façon similaire jusqu'au milieu de la maturation puis décroissent significativement (**Figure 41A, B et C**). Le poids sec augmente tout au long de la maturation avec une évolution en deux phases : une augmentation rapide en début de maturation (à partir de 10 jours après mi-véraison) puis un ralentissement à partir de 29 jours après véraison. Par définition, le poids sec correspond au poids d'une baie déshydratée = poids des pépins + poids de l'édifice cellulaire + poids des solutés. Sachant qu'après véraison, il n'y a plus de division cellulaires (Coombe, 1973; Dokoozlian, 2002) on peut donc considérer comme négligeable la variation du poids sec liée au poids de l'édifice cellulaire. En revanche la part liée au poids des pépins (**Figure 41E**) est à prendre en compte sachant que le poids moyen des pépins augmente jusqu'à mi-maturation, passant de 35,8 mg à 42,1 mg avant de diminuer significativement jusqu'à la récolte.

Durant la période de prélèvement, l'étude du nombre moyen de pépins par baie montre des valeurs relativement constantes quelle que soit la grappe récoltée et la phase de maturation considérée, avec en moyenne 1,2 pépins par baie pour une même grappe (**Figure 42E**). Ce nombre est calculé en divisant le nombre total de pépins dans une grappe par le nombre total de baies. Le nombre de pépins varie d'une baie à l'autre de 1 à 4, témoignant d'une hétérogénéité intra-grappe. De même, le nombre total de baie par grappe varie de 84 à 165 d'une grappe à l'autre témoignant d'une variabilité inter-grappe. Malgré une variabilité du nombre de pépins et du nombre total de baies, le nombre de pépin moyen par baie dans une grappe est comparable, laissant supposer une pollinisation relativement homogène d'une grappe à l'autre pour la parcelle étudiée.



**Figure 41. Evolution des principaux paramètres physiques au cours de la maturation (moyenne ; erreur-type), Les moyennes sont issues de l'analyse des baies issues de 3 grappes différentes, A : Hauteur (mm); B : Poids frais (g) ; C : Volume de la baie (mm<sup>3</sup>) ; D : Poids sec (g) ; E : Nombre pépins moyen ; F : Poids pépins (mg).**

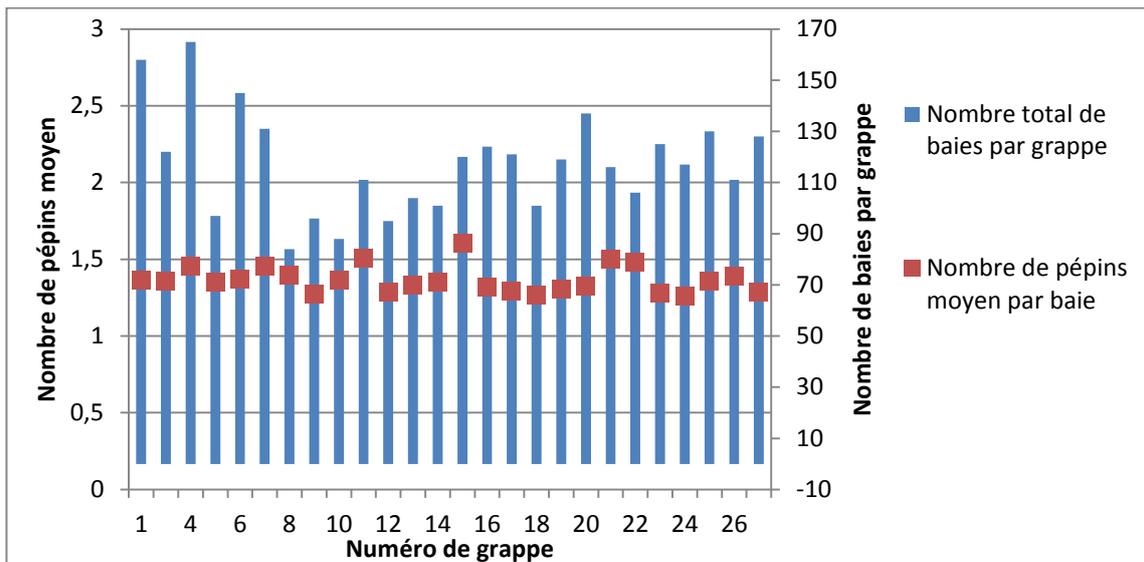
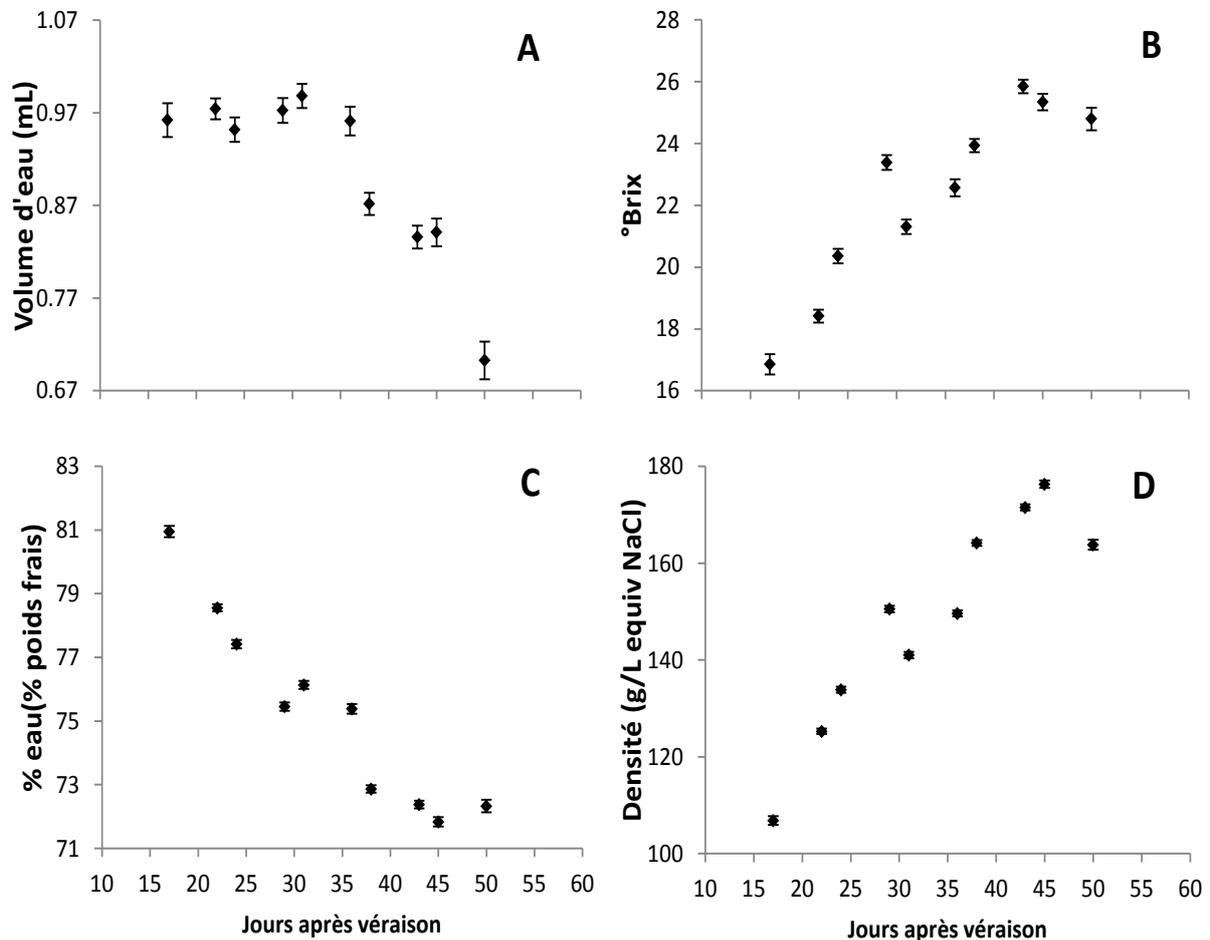


Figure 42. Nombre moyen de pépins par baie associé au nombre de baie par grappe.

La **Figure 43A** représente l'évolution de la quantité d'eau moyenne dans la baie au cours de la maturation. La teneur en eau est constante et proches de 0,97 ml/baie durant la première partie de la maturation puis diminue en fin de maturation. Cette perte en eau significative peut expliquer la diminution des paramètres liés à la taille et au poids de la baie. Le paramètre % Eau quant à lui décroît significativement tout au long de la phase de maturation passant de 81% à 72% (**Figure 43C**). Le °Brix et la densité présentent tous deux des courbes croissantes témoignant de l'accumulation de sucres dans la baie au cours de la période de maturation. Le °Brix passe de 17° en début de maturation à 25° à la récolte. La densité passe de 110 g/L equiv NaCl en début de maturation à 160 g/L equiv NaCl en fin de maturation (**Figure 43D**). L'allure des courbes associées à la densité et au °Brix montre que leur évolution au cours de la maturation a lieu en deux phases. Durant la première phase entre 17 et 29 jours après véraison, ces paramètres augmentent rapidement puis ralentissent entre 29 et 36 jours après véraison avant une reprise de l'augmentation des valeurs jusqu'à la récolte, 50 jours après véraison. Selon ces informations, l'évolution de la densité et du °Brix en début de maturation peut s'expliquer par une accumulation en solutés sans perte du volume d'eau qui reste constant durant cette période. Après avoir atteint un état stable entre 29 et 36 jours après véraison, une forte perte en eau est observée et induit

une concentration en sucre qui contribue à l'augmentation des valeurs de °Brix et de densité durant la seconde phase de maturation.



**Figure 43 Evolution de paramètres physiologique au cours de la maturation. (Moyenne  $\pm$  erreur-type) Les moyennes sont issues de l'analyse des baies issues de 3 grappes différentes, A : Volume d'eau (mL); B : °Brix (g) ; C : %eau (% poids frais) ; D : Densité (g/l equiv NaCl).**

### **III. Liens entre l'évolution des propriétés mécaniques et l'évolution des paramètres physiques et physiologiques.**

Dans le but de déterminer les liens pouvant exister entre les variables de texture et les principaux paramètres physiques et physiologiques étudiés, des analyses statistiques ont été effectuées en se basant sur la détermination du coefficient de Pearson ( $r$ ). Ce coefficient

dont la valeur est comprise entre -1 et +1 mesure le niveau de relation linéaire entre deux variables. Un coefficient proche de -1 ou de +1 indique une forte relation entre les paires de variables et le signe indique le sens de cette relation. En complément, un test de probabilité est appliqué pour chaque coefficient pour déterminer si la relation linéaire est significative au seuil de 5%. Ensuite une modélisation statistique par modèle de régression linéaire et non linéaire permettra d'exprimer les variables de texture en fonction d'une ou plusieurs variables physique et ou physiologiques. L'objectif est dans ce cas de montrer l'implication de ces variables dans l'évolution des propriétés mécaniques des baies.

### III.1. Analyse des corrélations

Les coefficients de corrélation de Pearson calculés entre les paramètres physiques, physiologiques et texturaux issues des moyennes des dix dates de prélèvement sont indiqués dans le **Tableau 19** Les paramètres liés à la taille de la baie (Hauteur, Poids frais, Volume de la baie) sont fortement et positivement corrélés entre eux ( $r = 0,89$  à  $0,99$ ). Ces résultats sont en accord avec d'autres travaux étudiant ces corrélations (Wei et al 2002 ; Ebadi et al 2009). La corrélation entre l'évolution de la densité et le °Brix est forte ( $r = 0,99$ ) et confirme l'utilité d'utiliser l'estimation de la densité des baies par flottaison comme un indicateur en lien avec la quantité de sucres présents dans la baie (Fournand et al 2006 ; Kountoudakis et al 2011). Le Poids sec est fortement et positivement corrélé avec la densité et le °Brix ( $r = 0,80$  et  $r = 0,76$ , respectivement). Ces trois facteurs sont eux-mêmes corrélés négativement avec le %eau avec des valeurs allant de  $r = -0,74$  à  $r = -0,99$ .

Les paramètres liés à la fermeté (F1 et W1) sont fortement et positivement corrélés avec les paramètres liés à la taille de la baie ( $r = 0,64$  à  $r = 0,81$ ) et négativement corrélés avec la densité et le °Brix ( $r = -0,67$  à  $r = -0,84$ ). Tous les paramètres de double compression sont corrélés au paramètre %eau ( $r = -0,66$  à  $r = 0,90$ ). L'ensemble de ces résultats indique qu'au cours de la maturation les baies les plus molles sont également les plus sucrées et les plus petites en poids et taille. La plus forte corrélation trouvée entre un paramètre de texture et un paramètre physiologique l'était pour les paramètres Grad1 et °Brix et Grad1 et densité ( $r = -0,91$  pour les deux paires de variables). Le signe négatif indique que la diminution de l'élasticité est directement liée à l'accumulation de sucre dans la baie.

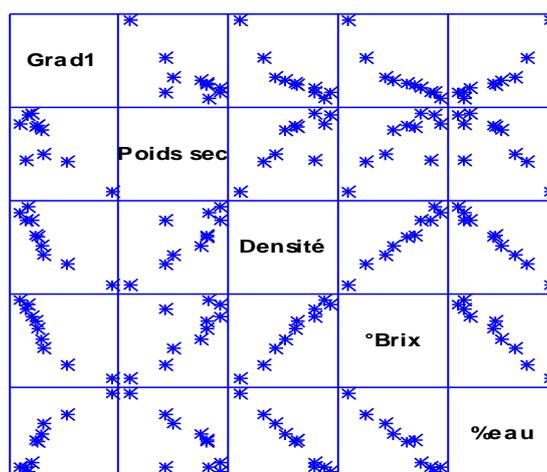
**Tableau 19. Coefficients de corrélation entre les paramètres physiques physiologiques et texturaux durant la maturation. Les résultats sont basés sur les valeurs moyennes (n=10), Les corrélations significatives sont en gras au seuil  $p < 0,01$  \*\*.**

Paramètre	Hauteur	Volume	Poids frais	Poids sec	Nombre de pépins	Poids des pépins	Densité	°Brix	Volume d'eau	% eau	F1	Grad0	Grad1	W1	Cohésion	Gommeux
Hauteur	–															
Volume	<b>0,99**</b>	–														
Poids frais	<b>0,93**</b>	<b>0,89**</b>	–													
Poids sec	0,26	0,29	0,27	–												
Nombre de pépins	<b>0,67**</b>	<b>0,65*</b>	0,61	0,11	–											
Poids des pépins	<b>0,76**</b>	<b>0,76**</b>	<b>0,79**</b>	0,32	0,58	–										
Densité	-0,36	-0,32	-0,35	<b>0,80**</b>	-0,30	-0,21	–									
°Brix	-0,40	-0,36	-0,37	<b>0,76**</b>	-0,33	-0,24	<b>0,99**</b>	–								
Volume d'eau	<b>0,87**</b>	<b>0,81**</b>	<b>0,93**</b>	-0,10	0,62	<b>0,69**</b>	<b>-0,67**</b>	<b>-0,67**</b>	–							
% eau	0,42	0,36	0,44	<b>-0,74**</b>	0,32	0,24	<b>-0,99**</b>	<b>-0,98**</b>	<b>0,73**</b>	–						
F1	<b>0,65*</b>	0,61	<b>0,64*</b>	-0,44	0,39	0,32	<b>-0,83**</b>	<b>-0,84**</b>	<b>0,83**</b>	<b>0,87**</b>	–					
Grad0	0,67	0,60	<b>0,74**</b>	-0,18	0,46	0,28	-0,61	-0,57	<b>0,84**</b>	<b>0,68**</b>	<b>0,88**</b>	–				
Grad1	0,21	0,18	0,18	<b>-0,81**</b>	0,17	0,04	<b>-0,91**</b>	<b>-0,91**</b>	0,50	<b>0,90**</b>	<b>0,84**</b>	0,57	–			
W1	<b>0,81**</b>	<b>0,78**</b>	<b>0,77**</b>	-0,18	0,47	0,42	<b>-0,67**</b>	<b>-0,67**</b>	<b>0,87**</b>	<b>0,73**</b>	<b>0,95**</b>	<b>0,92**</b>	<b>0,64*</b>	–		
Cohésion	-0,53	-0,48	-0,53	0,31	-0,35	-0,16	0,62	0,60	<b>-0,66*</b>	<b>-0,66*</b>	<b>-0,86**</b>	<b>-0,88**</b>	<b>-0,67**</b>	<b>-0,87**</b>	–	
Gommeux	<b>0,67**</b>	<b>0,63*</b>	<b>0,67**</b>	-0,41	0,37	0,39	<b>-0,82**</b>	<b>-0,84**</b>	<b>0,85**</b>	<b>0,87**</b>	<b>0,93**</b>	<b>0,76**</b>	<b>0,77**</b>	<b>0,87**</b>	-0,62	–

### III.2. Modélisation de l'évolution de la texture des raisins au cours de la maturation.

Dans le but de modéliser l'évolution des paramètres de double compression en fonction des paramètres physiques et physiologiques, une analyse des meilleurs modèles de prédiction des variables de texture a été effectuée. En utilisant les données moyennes de chacun des paramètres de double compression au cours de la maturation, l'analyse de régression permet de construire un modèle qui décrit la relation entre l'évolution des variables de texture à partir de l'évolution des paramètres physiques et/ou physiologiques étudiés. Le nombre de variables prédictives et le type de régression (linéaire ou non) sera décrit dans un tableau final pour chacun des paramètres de double compression. Les différentes étapes de l'élaboration d'un modèle de régression sont ici décrites au travers l'exemple du paramètre Grad1.

Dans le tableau de corrélation (**Tableau 17**), le paramètre Grad1 est corrélé avec 4 variables autres que les variables de texture : Poids sec ( $r = -0,81$ ) ; Densité ( $r = -0,91$ ) ; °Brix ( $r = -0,91$ ) et %eau ( $r = 0,90$ ). Bien que les coefficients de Pearson ( $r$ ) soient élevés et témoignent d'une relation linéaire entre les paramètres, l'analyse du nuage de point entre les valeurs de Grad 1 et les autres paramètres, montre une corrélation qui n'est pas totalement linéaire (**Figure 44**).



**Figure 44. Matrice des nuages de points du paramètre Grad1 et des variables qui lui sont corrélées.**

Le paramètre Grad 1 présente le coefficient de corrélation linéaire le plus élevé avec le paramètre °Brix. Les résultats de l'ajustement d'un modèle linéaire pour décrire la relation entre Grad 1 et °Brix est une équation sous la forme  $Y = a + b * X$ , où « Y » est la valeur de la variable à expliquer, « X » valeur de la variable explicative, « a » l'ordonnée à l'origine et « b » la pente associée à la droite de régression.

$$\text{Grad1} = 2,36986 - 0,0422493 * \text{Brix}$$

Coefficient de corrélation = -0,913946

R<sup>2</sup> = 83,5297 %

R<sup>2</sup> ajusté= 81,4709 %

La R<sup>2</sup> est un pourcentage de variabilité de la variable explicative qui a été expliquée par le modèle. Ici le R<sup>2</sup> indique que le modèle ajusté explique 83,5297% de la variabilité dans Grad1.

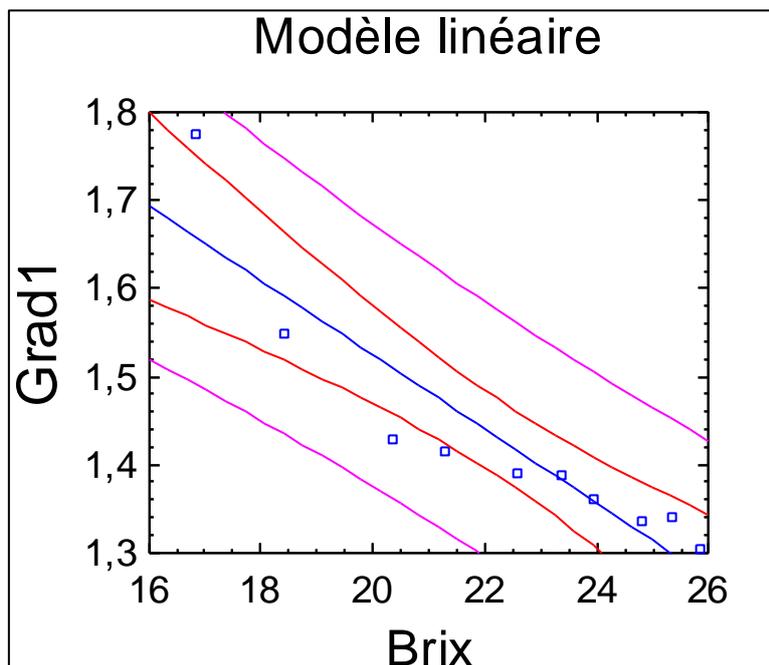


Figure 45. Graphique du modèle linéaire ajusté entre Grad1 et °Brix. Les limites internes indiquent les intervalles de confiance à 95,0% pour la moyenne d'un ensemble d'observations de Grad1 pour des valeurs données de Brix. Les limites externes indiquent les intervalles de prévision à 95,0% pour de nouvelles observations.

La comparaison avec des modèles non linéaires (**Tableau 20**) permet de mieux ajuster le modèle. Ainsi le modèle à double réciproque présente un R<sup>2</sup> de 94,19% soit 10,66% de mieux que le modèle non linéaire.

**Tableau 20. Comparaison de modèles non linéaires.**

Modèle	Comparaison des modèles alternatifs	
	Corrélation	R <sup>2</sup>
Réciproque double	-0,9705	94,19%
Courbe en S	0,9616	92,47%
Réciproque en X	0,9508	90,40%
Multiplicatif	-0,9468	89,64%
Réciproque en Y	0,943	88,93%
Logarithme en X	-0,9336	87,17%
Exponentiel	-0,9293	86,36%
Racine carré en Y	-0,9241	85,39%
Linéaire	-0,9218	84,97%

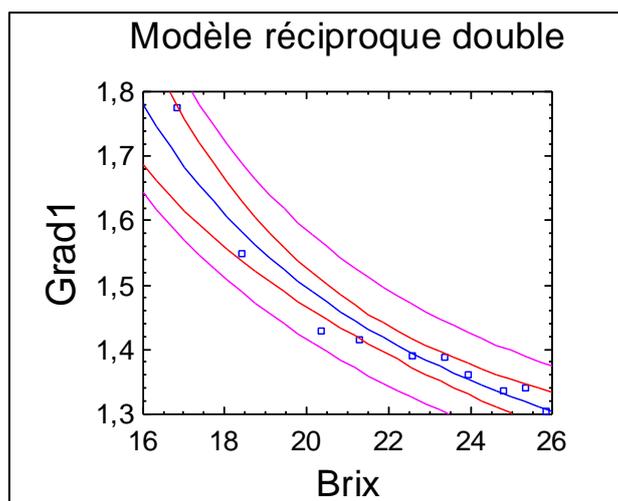
Ce modèle de double réciproque (**Figure 46**) indique que l'inverse de Grad1 est proportionnel à l'inverse du °Brix et est sous la forme Analyse de régression - Modèle réciproque double:  $Y = 1 / (a + b/X)$ .

$$\text{Grad1} = 1 / (1,09623 - 8,55492/\text{Brix})$$

Coefficient de corrélation = -0,970529

R<sup>2</sup> = 94,1926 %

R<sup>2</sup> ajusté= 93,4667 %



**Figure 46. Modèle réciproque double ajusté. Les limites internes indiquent les intervalles de confiance à 95,0% pour la moyenne d'un ensemble d'observations de Grad1 pour des valeurs données de Brix. Les limites externes indiquent les intervalles de prévision à 95,0% pour de nouvelles observations.**

Ces mêmes étapes décrites pour aboutir au meilleur modèle prédictif pour le paramètre Grad1 ont été réalisées pour les autres paramètres de double compression. Le **Tableau 21** résume les équations de modélisation de ces paramètres .

**Tableau 21 Modélisation de l'évolution des paramètres de double compression en fonction des paramètres physiques et physiologiques (n=10). La valeur de probabilité du modèle est calculée d'après le test de Fisher au seuil de 5%.**

Paramètre	Type de modèle	Equation du modèle	R <sup>2</sup> ajusté	Probabilité au seuil 5%
F1	Linéaire	<b>F1 = -6,05 + 0,26*Hauteur + 0,07* %eau</b>	82,42%	<0,001
Grad0	Réciproque double	<b>Grad0 = 1/(-0,90 + 2,39/ Volume d'eau)</b>	82,16%	<0,001
Grad1	Réciproque double	<b>Grad1 = 1/(1,09 - 8,55/Brix)</b>	93,43%	<0,001
W1	Réciproque en Y	<b>W1 = 1/(3,20 - 0,15*Hauteur - 0,01* %eau)</b>	84,29%	<0,001
Cohésion	Linéaire	<b>Cohésion = 0,48 - 0,13* Volume d'eau</b>	36,62%	<0,05
Gommeux	Linéaire	<b>Gommeux = -0,50 + 0,02*%eau</b>	71,76%	<0,01

Les modèles ajustés présentent des valeurs de R<sup>2</sup> élevées allant de 71,66% à 93,43%, indiquant que les modèles de régression calculés sont dans notre cas pertinents. Seul le

paramètre cohésion présente un modèle de régression linéaire assez faible ( $R^2 = 36,32\%$ ). Il semble que les variables physiologiques qui contribuent le plus à expliquer la variabilité des paramètres de double compression soient les paramètres liés à l'eau (volume d'eau et % d'eau) que l'on retrouve dans tous les modèles à l'exception du modèle de prédiction de Grad1. Ce résultat met en avant le rôle prépondérant de l'eau dans l'évolution des propriétés mécaniques des baies de raisin. La synthèse de ces résultats a permis d'aboutir à l'élaboration d'un schéma récapitulatif simplifié montrant des liens entre l'évolution de la fermeté des baies et des paramètres physiques et physiologiques (Figure 47).

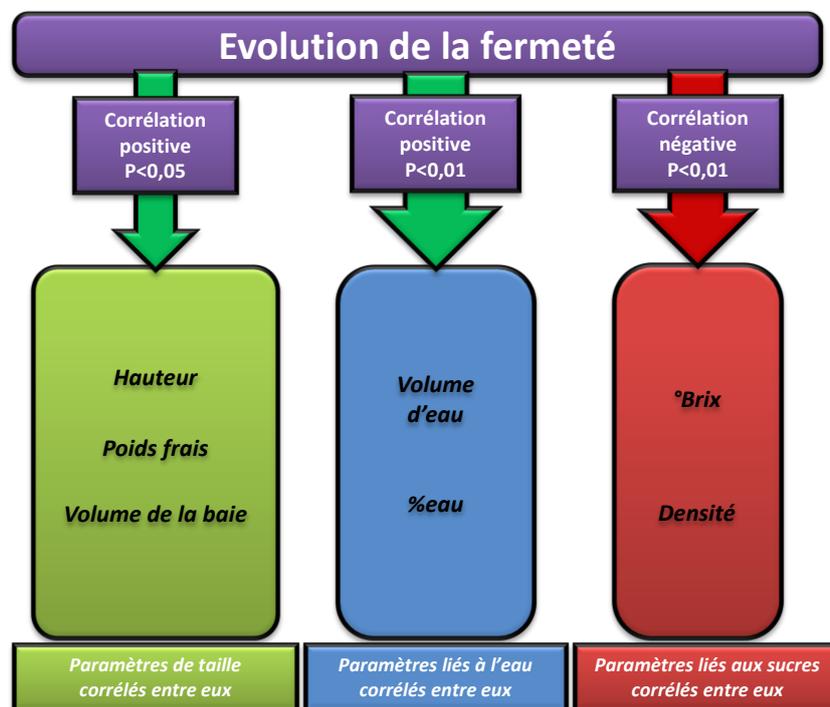


Figure 47. Schéma récapitulatif des liens entre l'évolution de la fermeté des baies et des paramètres physiques et physiologiques. Les résultats sont basés sur les coefficients de Pearson entre le F1 et les paramètres physiques et physiologiques.

#### IV. Etude de l'effet position des baies sur l'hétérogénéité des grappes de raisin.

Le dispositif expérimental utilisé au cours du millésime 2011 comprenait un échantillonnage au laboratoire permettant de classer les baies en fonction de leur position sur la grappe

avant le début des analyses de texture. Cette classification a été mise en place spécifiquement pour tester l'impact que peut avoir la position des baies sur la grappe sur les propriétés mécaniques ainsi que sur les paramètres physiques et physiologiques au cours de la maturation.

Une analyse de la répartition des baies sur les branches d'une même grappe a montré que la proportion relative des baies situées sur les deux premières branches latérales représente approximativement un tiers du nombre total de baies par grappe (**Tableau 22**).

**Tableau 22. Proportion relative de baies situées sur les deux premières branches de la grappe.**

Numéro de la grappe	Nombre de baies sur les deux premières branches de la grappe	Nombre total de baies	% des baies sur les deux premières branches
1	55	158	35%
2	48	122	39%
4	63	165	38%
5	28	97	29%
6	49	145	34%
7	39	131	30%
8	32	84	38%
9	32	96	33%
10	26	88	30%
11	38	111	34%
12	36	95	38%
13	29	104	28%
14	33	101	33%
15	35	108	32%
16	44	124	35%
17	39	121	32%
18	33	101	33%
19	39	119	33%
20	43	137	31%
21	40	116	34%
22	35	106	33%
23	46	125	37%
24	36	117	31%
25	44	130	34%
26	35	111	32%
30	40	128	31%
Moyenne			33%

Ainsi pour chaque date de prélèvement, les baies ont été réparties en fonction de leur position en trois classes égales, chacune représentant un tiers du nombre total de baies par grappe. La première classe, « haut », correspond aux baies situées sur les deux premières branches latérales au niveau basal de la grappe. Les deuxième et troisième classes correspondent respectivement aux baies des branches situées au « milieu » et « bas » de grappe (**Figure 22**).

Une analyse de variance est effectuée pour chacun des paramètres physiques, physiologiques et texturaux en fonction de la position sur la grappe, pour les trois périodes suivantes de la maturation (**Tableau 23**) :

- début de maturation (de 17 à 24 jours après mi-véraison) ;
- mi-maturation (de 29 à 36 jours après mi-véraison) ;
- fin de maturation (de 38 à 50 jours après mi-véraison).

L'analyse de variance révèle qu'il existe des différences significatives entre les différentes classes de position que l'on peut définir en deux gradients : un gradient positif où les valeurs des paramètres pour les baies situées en haut de grappe sont significativement plus élevées que celles situées en bas de grappe, et inversement un gradient négatif où les valeurs des paramètres situées en bas de grappe sont significativement plus élevées que celles situées en haut de grappe. Indépendamment du type de gradient considéré l'effet position est plus prononcé en début et fin de maturation avec respectivement 9 et 10 paramètres montrant des valeurs différentes en fonction de la position sur la grappe en comparaison avec la période de mi-maturation qui n'en présentait que 4.

**Tableau 23 Paramètres physiques, physiologiques et texturaux en fonction de la position des baies sur la grappe à trois périodes différentes de la maturation.**

Paramètre	Date											
	Début de maturation				Mi-maturation				Fin de maturation			
	Haut (n=298)	Milieu (n=295)	Bas (n=281)	<i>p</i>	Haut (n=313)	Milieu (n=322)	Bas (n=312)	<i>p</i>	Haut (n=358)	Milieu (n=363)	Bas (n=368)	<i>p</i>
Poids frais (g)	1,22 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,23 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,22 ± 0,01 <sup>a</sup>	ns	1,27 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,28 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,31 ± 0,01 <sup>a</sup>	ns	1,16 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,14 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,14 ± 0,01 <sup>a</sup>	ns
Poids sec (g)	0,27 ± 0,04 <sup>a</sup>	0,26 ± 0,04 <sup>a</sup>	0,26 ± 0,04 <sup>a</sup>	ns	0,30 ± 0,04 <sup>a</sup>	0,31 ± 0,04 <sup>a</sup>	0,32 ± 0,04 <sup>a</sup>	ns	0,32 ± 0,04 <sup>a</sup>	0,31 ± 0,04 <sup>a</sup>	0,32 ± 0,04 <sup>a</sup>	ns
Hauteur (mm)	12,39 ± 0,05 <sup>b</sup>	12,29 ± 0,05 <sup>ab</sup>	12,18 ± 0,05 <sup>a</sup>	<0,05	12,58 ± 0,05 <sup>a</sup>	12,46 ± 0,05 <sup>a</sup>	12,43 ± 0,05 <sup>a</sup>	ns	12,04 ± 0,07 <sup>a</sup>	11,93 ± 0,07 <sup>a</sup>	12,04 ± 0,07 <sup>a</sup>	ns
Volume baie (mm <sup>3</sup> )	1015,1 ± 13,7 <sup>b</sup>	988,3 ± 13,8 <sup>ab</sup>	966,3 ± 14,1 <sup>a</sup>	<0,05	1065,5 ± 14,1 <sup>a</sup>	1030,9 ± 13,9 <sup>a</sup>	1027,3 ± 14,0 <sup>a</sup>	ns	937,7 ± 17,8 <sup>a</sup>	917,4 ± 17,7 <sup>a</sup>	968,5 ± 17,6 <sup>a</sup>	ns
Nombre de pépins	1,40 ± 0,03 <sup>a</sup>	1,39 ± 0,03 <sup>a</sup>	1,33 ± 0,03 <sup>a</sup>	ns	1,40 ± 0,03 <sup>a</sup>	1,35 ± 0,03 <sup>a</sup>	1,42 ± 0,03 <sup>a</sup>	ns	1,41 ± 0,02 <sup>b</sup>	1,29 ± 0,02 <sup>a</sup>	1,33 ± 0,02 <sup>a</sup>	<0,05
Poids pépins (mg)	34,9 ± 0,9 <sup>a</sup>	38,5 ± 0,9 <sup>b</sup>	36,6 ± 0,9 <sup>ab</sup>	<0,05	39,90 ± 1,03 <sup>a</sup>	38,41 ± 1,01 <sup>a</sup>	41,99 ± 1,02 <sup>b</sup>	<0,05	36,98 ± 0,81 <sup>a</sup>	35,75 ± 0,80 <sup>a</sup>	37,91 ± 0,80 <sup>a</sup>	ns
Densité (g/l equiv NaCl)	121,59 ± 0,88 <sup>a</sup>	124,16 ± 0,90 <sup>b</sup>	126,13 ± 0,92 <sup>b</sup>	<0,01	146,03 ± 0,62 <sup>a</sup>	146,39 ± 0,61 <sup>a</sup>	148,83 ± 0,62 <sup>b</sup>	<0,01	168,42 ± 0,60 <sup>a</sup>	167,93 ± 0,60 <sup>a</sup>	171,06 ± 0,60 <sup>b</sup>	<0,001
°Brix	18,88 ± 0,21 <sup>a</sup>	19,06 ± 0,22 <sup>a</sup>	18,70 ± 0,22 <sup>a</sup>	ns	23,45 ± 0,28 <sup>a</sup>	23,40 ± 0,28 <sup>a</sup>	23,06 ± 0,28 <sup>a</sup>	ns	24,69 ± 0,21 <sup>a</sup>	24,57 ± 0,21 <sup>a</sup>	25,58 ± 0,21 <sup>b</sup>	<0,01
Volume eau (mL)	0,97 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,97 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,95 ± 0,01 <sup>a</sup>	ns	0,96 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,96 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,98 ± 0,01 <sup>a</sup>	ns	0,84 ± 0,12 <sup>a</sup>	0,83 ± 0,12 <sup>a</sup>	0,82 ± 0,12 <sup>a</sup>	ns
% eau (% poids frais)	79,09 ± 0,14 <sup>b</sup>	78,65 ± 0,014 <sup>a</sup>	78,41 ± 0,014 <sup>a</sup>	<0,01	75,81 ± 0,16 <sup>a</sup>	75,56 ± 0,16 <sup>a</sup>	75,45 ± 0,16 <sup>a</sup>	ns	72,59 ± 0,14 <sup>b</sup>	72,50 ± 0,14 <sup>b</sup>	71,65 ± 0,14 <sup>a</sup>	<0,001
F1 (N)	3,27 ± 0,03 <sup>c</sup>	3,14 ± 0,03 <sup>b</sup>	3,01 ± 0,03 <sup>a</sup>	<0,001	2,89 ± 0,02 <sup>a</sup>	2,91 ± 0,02 <sup>a</sup>	2,85 ± 0,02 <sup>a</sup>	ns	2,63 ± 0,02 <sup>b</sup>	2,52 ± 0,02 <sup>a</sup>	2,57 ± 0,02 <sup>a</sup>	<0,01
Grad0 (N/mm)	0,68 ± 0,01 <sup>c</sup>	0,61 ± 0,01 <sup>b</sup>	0,56 ± 0,01 <sup>a</sup>	<0,001	0,67 ± 0,01 <sup>c</sup>	0,65 ± 0,01 <sup>b</sup>	0,61 ± 0,01 <sup>a</sup>	<0,001	0,54 ± 0,01 <sup>c</sup>	0,49 ± 0,01 <sup>b</sup>	0,47 ± 0,01 <sup>a</sup>	<0,001
Grad1 (N/mm)	1,56 ± 0,02 <sup>a</sup>	1,55 ± 0,02 <sup>a</sup>	1,56 ± 0,02 <sup>a</sup>	ns	1,37 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,39 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,37 ± 0,01 <sup>a</sup>	ns	1,27 ± 0,02 <sup>a</sup>	1,31 ± 0,02 <sup>b</sup>	1,41 ± 0,02 <sup>c</sup>	<0,001
W1 (mJ)	2,48 ± 0,04 <sup>c</sup>	2,25 ± 0,04 <sup>b</sup>	2,09 ± 0,04 <sup>a</sup>	<0,001	2,12 ± 0,02 <sup>a</sup>	2,12 ± 0,02 <sup>a</sup>	2,04 ± 0,02 <sup>a</sup>	ns	1,78 ± 0,03 <sup>b</sup>	1,69 ± 0,03 <sup>a</sup>	1,79 ± 0,03 <sup>b</sup>	<0,05
Cohésion	0,339 ± 0,001 <sup>a</sup>	0,355 ± 0,001 <sup>b</sup>	0,368 ± 0,002 <sup>c</sup>	<0,001	0,347 ± 0,001 <sup>a</sup>	0,347 ± 0,001 <sup>a</sup>	0,356 ± 0,001 <sup>b</sup>	<0,001	0,371 ± 0,002 <sup>a</sup>	0,373 ± 0,002 <sup>a</sup>	0,384 ± 0,002 <sup>b</sup>	<0,001
Gommeux (N)	1,09 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,10 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,09 ± 0,01 <sup>a</sup>	ns	1,00 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,00 ± 0,01 <sup>a</sup>	1,01 ± 0,01 <sup>a</sup>	ns	0,94 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,93 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,99 ± 0,01 <sup>b</sup>	<0,001

**(Moyenne ± erreur standard) Les lettres différentes indiquent que le test de Fisher (LSD) montre des différences statistiquement significatives entre les positions au seuil de 5%.**

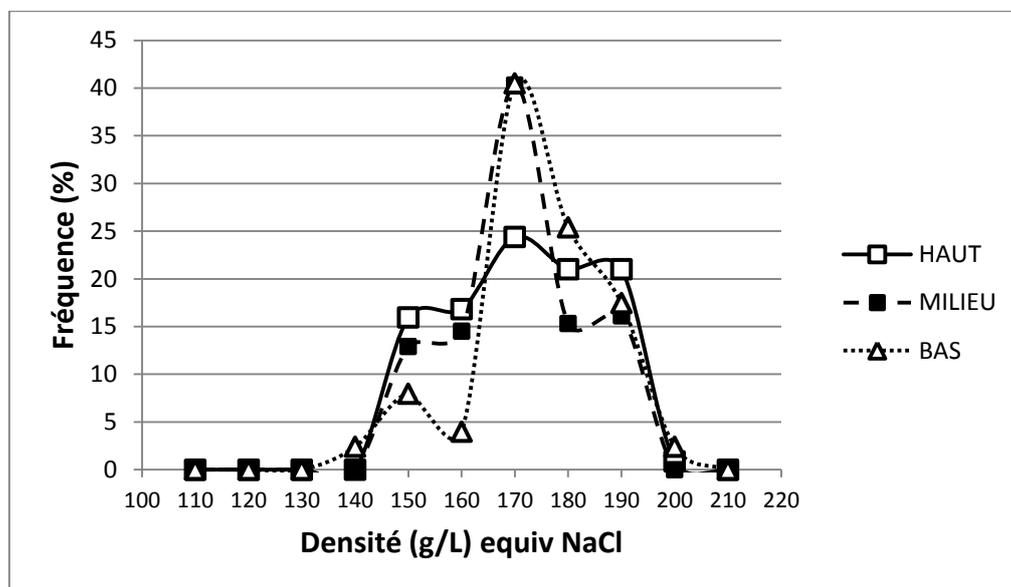
Parmi les paramètres physiques, la hauteur et le volume de la baie montent un gradient positif du haut vers le bas de la grappe en début de maturation alors qu'aucun gradient n'est observé en milieu ou en fin de maturation, suggérant une tendance à l'homogénéisation de la taille de baies au cours de la maturation. En revanche les paramètres liés au poids frais et poids sec de la baie ne sont pas influencés par la position sur la grappe au cours de la maturation. Le paramètre physiologique °Brix qui est lié aux sucres, est influencé significativement par l'effet position en fin de maturation avec des valeurs croissantes passant de 24,69 à 25,58 du haut vers le bas de la grappe ( $p < 0,01$ ).

Aucun effet position significatif n'est observé pour le paramètre volume d'eau pour les différentes phases de la maturation, alors que le paramètre %eau lui présente un gradient positif significatif en début ( $p < 0,01$ ) et fin de maturation ( $p < 0,001$ ).

Tous les paramètres de texture sont influencés significativement par l'effet position en fin de maturation. Les paramètres F1 et Grad0 montrent des valeurs décroissantes du haut vers le bas de la grappe. Quant aux paramètres Grad1, cohésion et gommeux, les valeurs mesurées pour les baies situées en position inférieure de grappe sont significativement supérieures à celles situées en haut de grappe ( $p < 0,001$ ).

Le paramètre densité qui est associé à la quantité de sucre dans la baie, est le seul montrant un effet position significatif pour les trois périodes de maturation considérées. De plus, l'effet position est plus marqué en fin de maturation ( $p < 0,001$ ), avec un gradient négatif où les valeurs des baies situées en bas de grappe (171,06 g/L equiv NaCl) sont plus élevées qu'en haut de grappe (168,42 g/L equiv NaCl). Afin de mieux considérer l'hétérogénéité liée à la densité au sein d'une grappe de raisin, la **Figure 48** présente les fréquences de distribution en fonction de la position pour les grappes récoltées en fin de maturation. Les fréquences de distributions associées, présentent des courbes d'allure Gaussienne centrées à la même valeur de 170 g/L equiv NaCl pour les trois positions mais dans des proportions différentes. On note que 40% des baies ont atteint une densité de 170 g/L equiv NaCl pour les positions milieu et bas de grappe, contre seulement 25% en haut de grappe. La position haut de grappe présente une proportion plus importante de baies moins sucrées ( $< 160$ g/L equiv NaCl) par rapport aux deux autres positions. En revanche, il n'y a pas de différences significatives dans la fréquence des baies les plus sucrées ( $> 190$ g/L equiv NaCl).

En résumé, les principales différences entre les positions sur la grappe sont observées pour les baies peu sucrées (< 160g/L) qui sont majoritairement présentes en haut de grappe, et les baies moyennement sucrées (160-180 g/L equiv NaCl) qui sont majoritairement présentes en bas de grappe.



**Figure 48. Courbes de fréquence de distribution de la densité en fonction de la position pour des grappes récoltées en fin de maturation.**

L'ensemble de ces résultats montre que la position de la baie sur la grappe est un facteur d'hétérogénéité non négligeable qui influence à la fois des paramètres physiques physiologiques et texturaux des baies. Parmi les observations menées sur l'effet position, il est apparu que la position milieu de grappe est un intermédiaire entre les valeurs extrêmes rencontrées en haut et bas de grappe. En effet pour chacun des paramètres considérés, la position milieu présentait des valeurs proches de celles en haut de grappe ou en bas de grappe, mais ne jamais de valeurs significativement différentes des deux positions à la fois. La position milieu de grappe apparaît comme une position intermédiaire entre les valeurs extrêmes du haut et du bas de la grappe. Le **Tableau 24** montre les résultats d'un test de comparaison d'échantillonnage tenant compte, soit de la totalité des baies sur la grappe, soit seulement les baies issues de la position milieu de grappe toutes dates confondues. Les valeurs de comparaison de moyenne pour tous les paramètres étudiés ne présentent aucune

différence significative entre les deux types d'échantillonnage. Ainsi la position milieu de grappe est hautement représentative de l'intégralité de la grappe.

**Tableau 24. Test de comparaison d'échantillonnage en grappe entière et échantillonnage des baies en milieu de grappe. Le test a été réalisé avec toutes les dates de prélèvement confondues. ns= non significatif.**

	Moyenne $\pm$ erreur standard		t test	Probabilité	Significativité
	Echantillonnage grappe entière	Echantillonnage milieu de grappe			
Hauteur (mm)	12,25 $\pm$ 1,15	12,21 $\pm$ 1,06	0,86	0,38	ns
Volume baie (mm <sup>3</sup> )	989,20 $\pm$ 286,02	976,94 $\pm$ 259,27	1,24	0,21	ns
Poids frais (g)	1,22 $\pm$ 0,30	1,21 $\pm$ 0,29	0,19	0,84	ns
Densité (g/l equiv NaCl)	147,37 $\pm$ 22,98	146,78 $\pm$ 22,17	0,72	0,46	ns
Nombre de pépins	1,37 $\pm$ 0,56	1,35 $\pm$ 0,54	1,34	0,17	ns
Poids pépins (mg)	37,77 $\pm$ 16,58	37,47 $\pm$ 15,45	0,51	0,6	ns
Poids sec (g)	0,29 $\pm$ 0,08	0,29 $\pm$ 0,08	0	0,99	ns
Volume d'eau (mL)	0,92 $\pm$ 0,24	0,92 $\pm$ 0,23	-0,05	0,95	ns
% eau (% poids frais)	75,42 $\pm$ 3,86	75,48 $\pm$ 3,68	-0,45	0,64	ns
°Brix	22,42 $\pm$ 5,13	22,39 $\pm$ 4,83	0,2	0,83	ns
F1 (N)	2,86 $\pm$ 0,61	2,85 $\pm$ 0,53	0,72	0,44	ns
Grad0 (N/mm)	0,58 $\pm$ 0,14	0,58 $\pm$ 0,13	0,77	0,43	ns
Grad1 (N/mm)	1,42 $\pm$ 0,33	1,41 $\pm$ 0,29	0,57	0,56	ns
W1 (mJ)	2,03 $\pm$ 0,68	2,01 $\pm$ 0,62	1,09	0,27	ns
Cohésion	0,36 $\pm$ 0,03	0,35 $\pm$ 0,03	0,99	0,31	ns
Gommeux (N)	1,02 $\pm$ 0,16	1,01 $\pm$ 0,15	1,12	0,26	ns

## V. Discussion

La compréhension des facteurs impliqués dans l'évolution de la texture des baies est importante, mais peu d'études ont combiné à la fois l'évolution de paramètres physiques, physiologiques et texturaux et encore moins, ont pris en compte l'impact que peut avoir la position de la baie sur la grappe pour ces paramètres. Dans ce chapitre, l'évolution de la

texture des baies au cours de la maturation par la méthode instrumentale de double compression 20%, a servi à identifier quand et de quelle manière ont lieu les changements de comportement textural des baies de Cabernet Franc. En parallèle, l'analyse des paramètres physiques et physiologiques classiques de caractérisation des baies, a permis d'évaluer leur contribution dans l'évolution de la texture.

### ***Le rôle de l'eau dans l'accumulation des sucres et la texture des baies***

Comme attendu, la concentration en sucre a augmentée rapidement au cours de la maturation (Coombe et McCarthy, 2000), en deux phases qui ont été étroitement liées à la dynamique de l'eau. En effet, les variations de densité et de °Brix en début de maturation peuvent être expliquées par une accumulation des solutés issus de la photosynthèse sans perte d'eau, dont le volume moyen ne montre pas de différences significatives. La deuxième phase d'augmentation a lieu après la mi-véraison en même temps que la baisse significative du volume d'eau intra-baie. La baie se concentre en sucre et contribue à la deuxième phase d'augmentation du °Brix et de la densité. La perte en eau peut être la conséquence de la baisse avérée du flux xylémien (Greenspan et al, 1996) associé à la transpiration (Rogiers et al, 2004). Dans un modèle de fonctionnement général des réseaux vasculaires chez le raisin, Coombe et McCarthy (2000) décrivent un arrêt du flux xylémien après véraison par une baisse de leur conductance hydraulique alors que le flux phloémien augmente. Le flux de soluté via le phloème stimule l'accumulation de soluté dans la baie entraînant une baisse de la pression de turgescence à la véraison (Wada et al, 2008) qui à son tour serait le signal selon Thomas et al (2008) pour la mise en place de la maturation proprement dite.

Le ramollissement des baies au cours de la maturation a pu être ici mis en évidence. Une diminution significative des paramètres liés à la fermeté des baies (F1 et W1) est observée en deux phases séparées par un plateau à mi-maturation. Après la mi-maturation, la baisse de fermeté est concomitante avec une forte perte en eau. Cette observation et la forte corrélation entre W1 et le volume d'eau ( $r = 0,81$ ) vont dans le sens d'un rôle majeur de l'eau dans l'évolution de la texture des baies de raisin. De plus, l'établissement de modèles prédictifs pour l'évolution des paramètres de double compression montrait un lien étroit avec les variables liées au volume et à la proportion d'eau dans la baie. Comme tous les

fruits charnus, le ramollissement des baies au cours de la maturation implique des modifications de structure de la paroi cellulaire associé à une baisse de la pression de turgescence (Thomas et al, 2008 ; Goulao et Oliveira 2008). La pression de turgescence est un déterminant fondamental des propriétés mécaniques des tissus végétaux (Bruce, 2003). Chez la tomate, le ramollissement du fruit résulte de la baisse rapide de la pression de turgescence associée à la dégradation de la paroi cellulaire (Saladié et al. 2007). Plusieurs études sur les fruits charnus (melon, concombre, potiron, et tomate) ont montré la relation entre la pression de turgescence cellulaire et la fermeté des tissus (Rojas et al, 2001 ; Sajnin et al, 2003). Pour le raisin, l'élasticité des baies obéit à la même relation (Thomas et al, 2008 ; Wada et al, 2008).

### ***L'effet position intra-grappe***

Dans cette étude, la position de la baie sur la grappe s'est révélé être un facteur non négligeable d'hétérogénéité. Deux types de gradient ont été mis en évidence. Le premier, un gradient positif du haut vers le bas de la grappe, a montré que les baies situées en haut de grappes étaient statistiquement plus fermes avec une proportion d'eau plus importante que celles situées en bas de grappe. A l'inverse, le second gradient négatif cette fois-ci, montrait que les baies situées en bas de grappes étaient plus ramollies et présentaient des valeurs de paramètres liés aux sucres (densité, °Brix) plus élevées. Des résultats similaires ont été trouvés dans les travaux de Pagay et Cheng (2010) qui ont également montré la tendance des baies situées en bas de grappe à avoir un taux plus important composés solides solubles. La variabilité des fruits en fonction de leur position a déjà fait l'objet d'étude chez d'autres fruits comme la tomate (Bertin et al, 2001). Bohner et Bangerth (1988) ont montré qu'à maturité il existait des différences de taille entre des tomates en position distale ou proximale et que ces différences étaient dues au nombre de cellules constituant l'ovaire des fleurs de tomate à l'anthèse. Chez la banane, Jullien et al (2001) ont montré que la floraison et la pollinisation commençaient par le haut du régime de banane et que les fruits qui se développaient par la suite conservaient cette avance par rapport à ceux situés dans les parties basses du régime. Pour la grappe de raisin les gradients mis en évidence dans cette étude pourraient être la conséquence de différentes capacités d'assimilation des produits issus de la photosynthèse via le phloème mais cette hypothèse reste à confirmer.

Cependant, l'initiation de la floraison du raisin est connue de manière empirique comme étant séparée entre les parties hautes et basses de la grappe, les ailerons présentant généralement une floraison décalée. De plus, les conditions climatiques sont un facteur influençant fortement la durée de la floraison au sein d'une grappe (Ewart et Kliewer, 1997 ; Ebadi et al, 1995). Des températures basses au moment de la floraison ( $< 20^{\circ}\text{C}$ ) et des précipitations induisent une durée plus longue de la période de floraison qui peut conduire à des écarts de développement entre les baies plus marqués. A l'inverse une floraison qui a lieu dans des conditions plus favorable (températures élevées, faible pluviométrie) sera plus rapide dans le temps et limitera l'hétérogénéité lié à l'apparition des fleurs sur la grappe. Dans cette étude, les conditions climatiques la semaine précédant la mi-floraison (21 mai 2011) présente des températures moyennes de  $16^{\circ}\text{C}$  sans précipitations. La faible température peut donc être à l'origine d'un étalement des floraisons au sein des grappes conduisant aux gradients d'hétérogénéité observés.

#### ***La texture comme critère de qualité pour la maturation des raisins***

Dans cette étude, l'évolution des paramètres de double compression a montré des changements significatifs au cours de la maturation pas uniquement entre des dates éloignées mais également entre des dates proches. Les paramètres F1, Grad0, Grad1, W1, et Gommeux diminuent significativement alors que le paramètre cohésion augmente durant la maturation. L'étude des corrélations a mis en évidence des corrélations positives entre la fermeté des baies et les paramètres liés à leur taille et les paramètres liés à l'eau. De plus, de fortes corrélations négatives ont été observées entre F1 et  $^{\circ}\text{Brix}$  et la densité. Nos résultats ici suggèrent qu'à maturité, les baies les plus ramollies sont plus riches en sucre et sont plus petite en taille et poids. Les précédentes études s'intéressant à la mesure instrumentale de la texture des baies de raisin n'ont montré que des tendances de baisse des propriétés mécaniques en lien avec l'accumulation des sucres (Maury et al, 2009; Zouid et al, 2010 ; Rio Segade et al, 2011a ; Rolle et al, 2012).

Dans les travaux de Maury et al (2009) et Zouid et al (2010) qui se sont également intéressés au mesure de double compression sur raisin Cabernet Franc au cours de la maturation, le type de protocole d'échantillonnage des baies correspondait généralement en un

échantillonnage aléatoire à l'échelle de la parcelle afin de récolter à chaque date un nombre important de baies (200 à 450) représentant au maximum 3 à 5 baies par grappe. Ensuite des lots de 30 à 50 baies sont tirés aléatoirement pour réaliser la mesure de texture. Or comme nous l'avons montré, les paramètres de double compression sont largement influencés par les paramètres physiques et physiologiques intra-baie. De même, la position de la baie sur la grappe influence à la fois la maturation et l'hétérogénéité. Or ce type d'échantillonnage aléatoire ne permet pas de maîtriser l'éventail d'hétérogénéité existant entre les baies qui soit comparable d'une date à l'autre. Dans cette étude nous avons montré qu'en effectuant un échantillonnage des baies issues d'une même grappe, il était possible de montrer des évolutions significatives cohérentes pour les paramètres de double compression tout en conservant une évolution cohérente des paramètres physiques et physiologiques majeurs. L'avantage d'un protocole d'échantillonnage pour les mesures de texture, basé sur la récolte de grappes entières est qu'il permet de couvrir l'ensemble de la variabilité texturale de par les différences existantes entre les baies d'une même grappe à un instant donné et que la variabilité peut être comparable d'une grappe à l'autre et donc d'une date à l'autre. L'échantillonnage grappe entière permet donc une meilleure maîtrise de la variabilité texturale. Cependant, le nombre important de baies dans une grappe (124 en moyenne pour le millésime 2011) et le fait qu'il y ait besoin d'analyser plusieurs grappes pour une même date, rendent assez longue l'analyse de la texture. Mais dans cette étude nous avons montré que l'hétérogénéité présente dans les baies issues du milieu de la grappe était comparable à celle présente dans la grappe entière. En effet, un test de comparaison entre l'échantillonnage grappe entière et milieu de grappe n'a pas montré de différences significatives entre les valeurs moyennes des paramètres texturaux étudiés au cours de la maturation. Dans le cas d'un suivi de l'évolution de la maturité texturale au cours de la maturation, l'échantillonnage milieu de grappe sera un protocole d'échantillonnage alternatif fiable et plus facilement réalisable que l'analyse de l'ensemble des baies d'une même grappe. Le nombre d'échantillons à analyser y est réduit d'un tiers, passant environ de  $3 \times 100^{\text{aine}}$  de baies à  $3 \times 30^{\text{aine}}$  de baies (considérant la répétition des mesures sur 3 grappes différentes pour une même date).

## VI. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré l'intérêt de considérer la texture comme un critère de qualité complémentaire aux suivis de maturité classiques en montrant des corrélations entre les paramètres de double compression et des facteurs physiques et physiologiques clés pour l'établissement de la qualité de la récolte. A ce stade de l'étude, les conclusions relatives à l'analyse des régressions linéaires et coefficients de corrélation de Pearson entre les paramètres de double compression et les paramètres liés à l'eau ne permettent pas de conclure catégoriquement quant au rôle exact de l'eau dans les propriétés mécaniques des baies. Ces premiers résultats soulignent cependant l'intérêt d'autres indicateurs liés à l'état hydrique des baies pouvant avoir un impact sur les propriétés texturales. La mesure de l'activité de l'eau ( $A_w$ ) des baies, la mesure du potentiel hydrique foliaire des feuilles situées à proximité directe des grappes à analyser, peuvent être des pistes envisageables d'études complémentaires du lien étroit entre l'eau et les propriétés mécaniques.

Dans ce chapitre nous avons également exploré l'hétérogénéité intra grappe au cours de la maturation. Les différences significatives observées entre les positions extrêmes de la grappe nous a conduit à proposer une stratégie de protocole d'échantillonnage représentatifs et répétables d'une date à l'autre dans le cadre tenant d'un suivi de maturité texturale au cours de la maturation.

La période de maturation est connue comme étant largement influencée par les conditions macro climatiques responsables notamment des effets millésimes observés d'une année à l'autre pour une même parcelle. Mais au-delà des conditions climatiques générales, les maturités technologiques et phénologiques des grappes sont sous l'influence de conditions microclimatiques qui conduisent également à de la variabilité. Dans le chapitre suivant nous avons voulu savoir si les conditions liées au microclimat des grappes peuvent avoir une influence significative sur les propriétés mécaniques des baies de raisin et donc sur l'évolution de la maturité texturale.

## Chapitre 3 : Etude de l'exposition des baies sur l'hétérogénéité des grappes de raisin Cabernet Franc au cours du millésime 2012

Dans le chapitre précédent nous avons mis en évidence les liens existants entre l'évolution des paramètres de texture et les principaux paramètres physiques et physiologiques des baies. Des gradients liés à la position des baies sur la grappe ont montré que les baies situées en bas de grappes avaient un degré de maturité technologique plus élevé que les baies situées en haut de grappe. A l'inverse les baies situées en haut de grappe sont à un stade de maturité texturale moins avancé et sont plus fermes que le reste de la grappe. Ces différents gradients observés à l'échelle de la grappe, amènent à s'interroger sur le rôle direct du microclimat de la grappe sur la maturation des baies qui la composent. Parmi les variables du microclimat, l'exposition des baies à la lumière solaire couplée à la température, a fait l'objet de nombreuses études afin de comprendre leur influence sur la maturation des baies. Ainsi, il a été démontré que la température et les radiations solaires agissaient notamment sur l'accumulation des composés phénoliques (Kliewer et Torres, 1972 ; Spayd et al, 2002 ; Downey et al, 2004; Cortell et al, 2006 ; Tarara et al, 2008). Le but de cette partie est d'étudier l'impact du microclimat de la grappe sur l'hétérogénéité intra-grappe, en comparant l'évolution des paramètres texturaux, physiques et physiologiques de baies issues de grappes dont la maturation s'est effectuée entièrement à l'ombre ou exposées à la lumière solaire. Pour cela au cours du millésime 2012, un dispositif d'ombrage a été mis en place sur 1/3 des grappes dès la date de mi-véraison du 22 août 2012. Cet essai complémentaire à ce travail de thèse n'a été réalisé que sur un seul millésime suite à l'analyse des premiers résultats du millésime 2011. L'objectif étant de commencer à explorer les pistes du rôle direct du climat, et notamment de l'ensoleillement, au niveau de la grappe, sur la maturation des baies qui la composent.

La première partie de ce chapitre sera une évaluation globale des résultats obtenus au cours du millésime 2012 en comparaison de ceux obtenus au cours du millésime 2011 afin de voir si les grandes tendances observées dans l'évolution des paramètres de texture étudiées sont répétables d'une année à l'autre.

La deuxième partie présente l'impact du facteur exposition sur l'évolution des propriétés mécaniques et les paramètres physiques et physiologiques des baies de raisin Cabernet Franc au cours du millésime 2012.

## I. Comparaison des millésimes 2011 et 2012

La comparaison de la variabilité de l'ensemble des données de paramètres de double compression et des paramètres physiques et physiologiques pour les deux millésimes 2011 et 2012 a été effectuée par analyse de variance. Bien qu'en 2012 la période de récolte se soit plus étendue dans le temps en raison d'un retard des stades phénologiques de la vigne par rapport à 2011 (+19 jours pour la mi-floraison et +21 jours pour la mi-véraison), la comparaison des deux millésime a été effectuée sur la base de 5 stades de la vigne communs aux deux années couvrant l'ensemble de la maturation: 22, 29, 36, 43, et 50 jours après mi-véraison. Les résultats de l'analyse de variance (

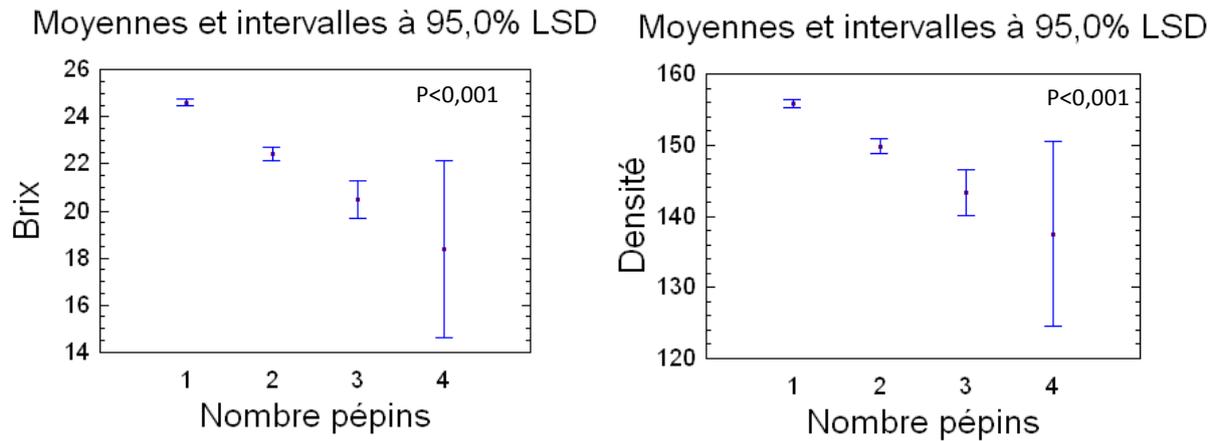
**Tableau 25)** indiquent qu'il n'existe pas d'effet millésime significatif pour les paramètres liés à la taille et au poids de la baie. Un faible effet millésime est mis en évidence pour le paramètre % eau ( $p < 0,05$ ) alors que tous les paramètres de double compression étudiés présentent un effet millésime très marqué de même que les paramètres densité et °Brix et nombre de pépins ( $p < 0,001$ ).

**Tableau 25. Analyse de variance en fonction du facteur millésime.**

	Moyenne $\pm$ erreur type		Effet millésime	
	2011	2012	F	Probabilité
<b>Paramètres physiques</b>				
Hauteur (mm)	12,16 $\pm$ 0,03	12,09 $\pm$ 0,04	2,02	0,16 ns
Volume baie (mm <sup>3</sup> )	964 $\pm$ 7	951 $\pm$ 8	1,44	0,23 ns
Poids frais (g)	1,22 $\pm$ 0,01	1,20 $\pm$ 0,01	1,47	0,23 ns
Poids sec (g)	0,328 $\pm$ 0,002	0,319 $\pm$ 0,03	0,15	0,69 ns
Nombre pépins	1,35 $\pm$ 0,01	1,23 $\pm$ 0,02	30,15	0,00 ***
Poids pépins (mg)	38,41 $\pm$ 0,44	39,32 $\pm$ 0,52	1,77	0,18 ns
<b>Paramètres physiologiques</b>				
Densité (g/L equiv NaCl)	149,51 $\pm$ 0,47	160,93 $\pm$ 0,58	235,96	0,00 ***
°Brix	23,13 $\pm$ 0,12	25,32 $\pm$ 0,16	120,17	0,00 ***
Volume eau (mL)	0,90 $\pm$ 0,01	0,88 $\pm$ 0,01	2,93	0,09 ns
%eau (% Poids frais)	73,72 $\pm$ 0,13	73,32 $\pm$ 0,16	3,98	0,04 *
<b>Paramètres texturaux</b>				
F1 (N)	2,78 $\pm$ 0,02	3,78 $\pm$ 0,02	1653	0,00 ***
Grad0 (N/mm)	0,57 $\pm$ 0,004	0,84 $\pm$ 0,01	1432	0,00 ***
Grad1 (N/mm)	1,41 $\pm$ 0,01	1,83 $\pm$ 0,01	831	0,00 ***
W1 (mJ)	1,91 $\pm$ 0,02	2,83 $\pm$ 0,02	1280	0,00 ***
Cohésion	0,366 $\pm$ 0,001	0,311 $\pm$ 0,001	1333	0,00 ***
Gommeux (N)	1,007 $\pm$ 0,004	1,16 $\pm$ 0,01	496	0,00 ***

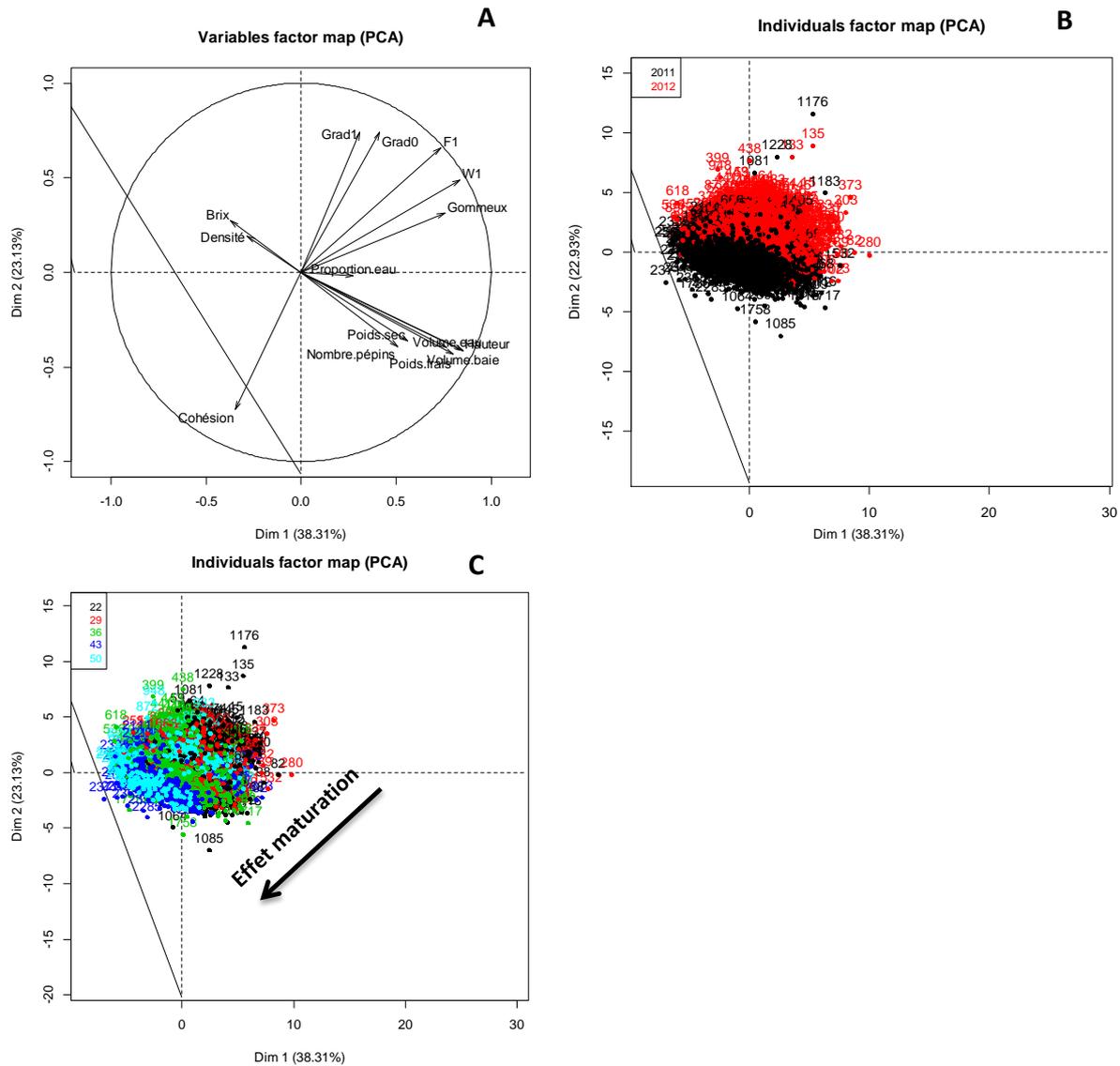
**Significativité : p<0,001 \*\*\* ; p<0,01 \*\* ; p<0,05 \* ; ns= non significatif.**

En comparant les moyennes des paramètres obtenues en 2012 on remarque qu'au niveau des paramètres de texture les données sont plus élevées qu'en 2011 indiquant des baies plus fermes et donc un retard dans l'avancement de la maturité texturale. En revanche concernant les paramètres physiologiques liés aux sucres : densité et °Brix, c'est en 2012 que les valeurs obtenues sont les plus élevées ce qui pourrait paraître surprenant sachant que le millésime 2012 était une année avec des conditions climatiques moins favorables qu'en 2011 avec une pluviométrie plus importante surtout en fin de maturation (Annexe 4). Cependant ce résultat pourrait s'expliquer par le fait qu'en 2012 le nombre de pépins moyen par baie d'une même grappe (1,25) est inférieur à celui obtenus en 2011 (1,35), or l'analyse des corrélations entre le nombre de pépins, la densité et le °Brix (**Figure 49**) montre une relation négative significative. Ainsi l'augmentation du nombre de pépins par baie est en lien avec des valeurs de concentrations en sucres plus faibles.



**Figure 49. Moyenne des °Brix et densité en fonction du nombre croissant de pépin par baie.**

Les mêmes données ayant servies à l'analyse de variance ont été analysées par la méthode d'analyse en composante principale (ACP) dans le but d'avoir une nouvelle représentation de la variabilité observée dans nos données (**Figure 50**). L'analyse du positionnement des variables (**Figure 50 A**) montrent quatre groupes de variables distincts : les paramètres de double compression qui sont opposés au paramètre cohésion et les paramètres liés au sucre (°Brix et densité) qui sont opposés aux paramètres physiques liés à la taille et au poids des baies. Les résultats confirment un fort effet millésime étant donné la discrimination marquée entre les individus des différents millésimes surtout sur l'axe 2 de la composante principale (PC2 ; **Figure 50 B**). Les variables de textures sont celles qui expliquent le plus la variabilité rencontrée sur la composante PC2. De plus l'analyse du positionnement des individus en fonction de la date de prélèvement montre une discrimination essentiellement sur la première composante (PC1 ; **Figure 50 B**). Les résultats de l'ACP confirment ceux observés pour l'ANOVA montrant que les principales différences observées entre les deux millésimes pour un même stade de développement se situent essentiellement au niveau des propriétés mécaniques des baies, qui semblent être très sensible aux variations de climat et de conditions météorologiques d'une année à l'autre.



**Figure 50. Résultats de l'analyse en composante principale effectuées sur les données issus des 5 dates communes entre les millésimes 2011 et 2012. A : Positionnement des variables ; B : Positionnement des individus colorés selon le millésime 2011 (noir) et 2012 (rouge) ; C : Positionnement des individus colorés en fonction de la date de prélèvement (22 j après véraison noir ; 29 j rouge ; 36 j vert ; 43 j bleu foncé ; 50 j bleu clair).**

Bien que les valeurs moyennes des paramètres de double compression pour une même date soient significativement différentes entre les deux millésimes, les grandes tendances d'évolution au cours de la maturation restent comparables d'une année à l'autre avec une diminution des paramètres liés à la fermeté et l'élasticité des baies de raisin et une augmentation du paramètre cohésion Figure 51. Les mêmes tendances d'évolution sont

également retrouvées entre les deux millésimes pour les paramètres physiques et physiologiques (Annexe 2 et Annexe 3).

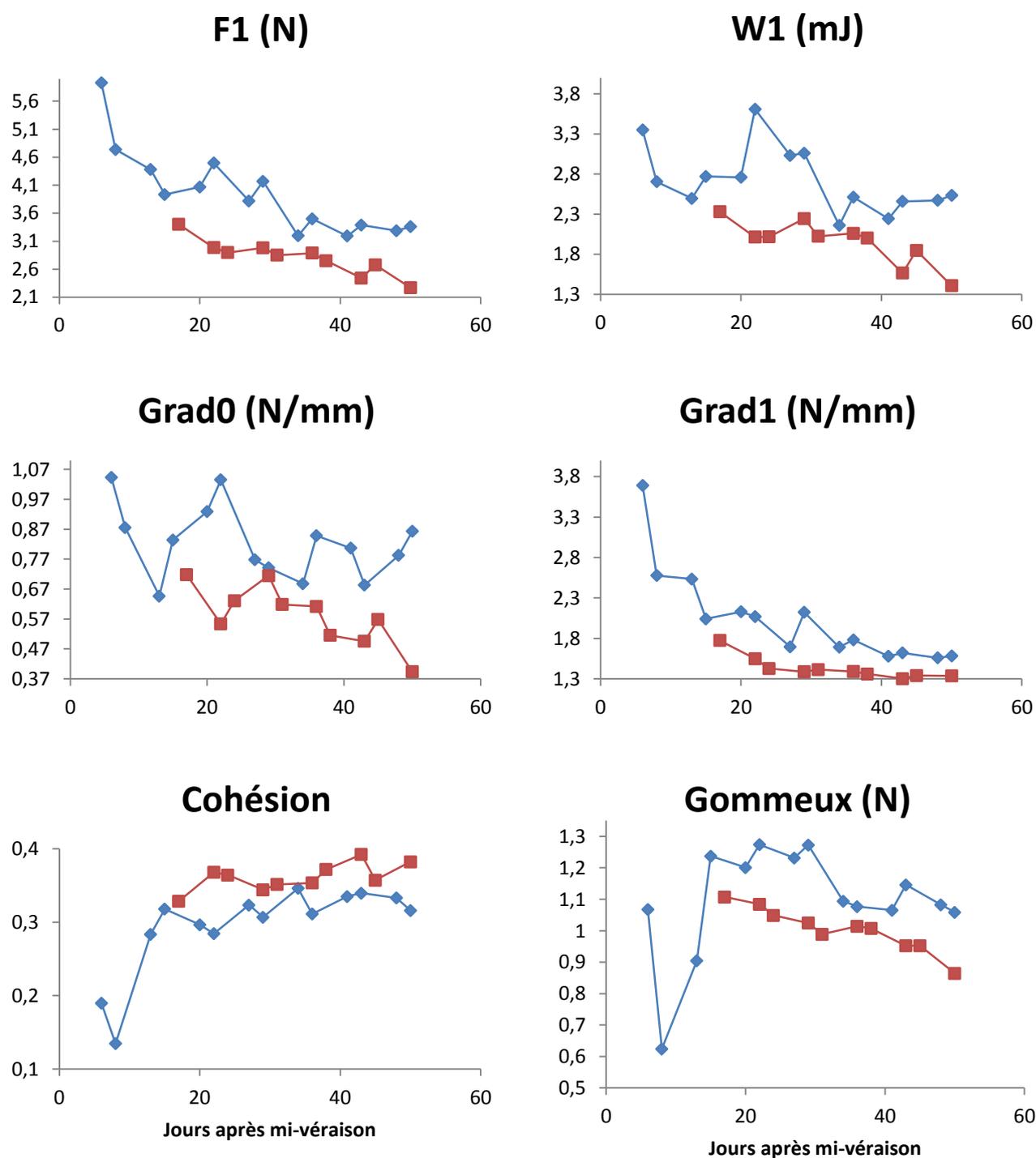
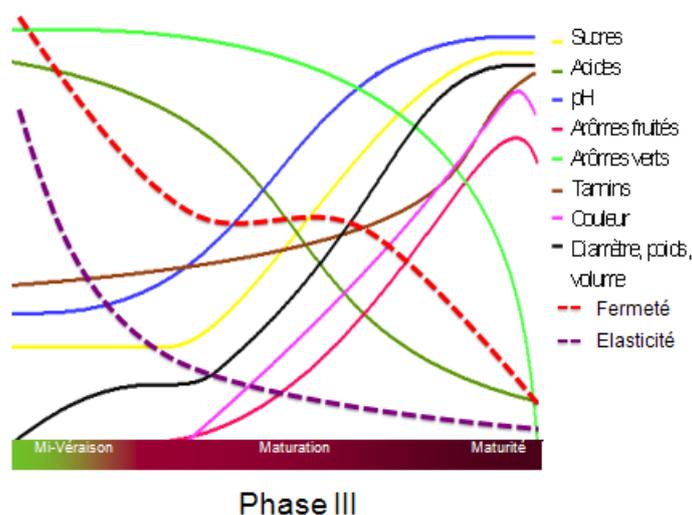


Figure 51. Comparaison de l'évolution des paramètres de double compression au cours de la maturation entre les millésimes 2011 (trait rouge ; marqueur carré) et 2012 (trait bleu ; marqueur losange).

La similarité des tendances d'évolution des propriétés mécaniques sur deux millésimes confirme l'efficacité de l'utilisation d'un protocole d'échantillonnage sur grappe entière pour mettre en évidence l'évolution de la maturité texturale des baies de raisin. Le schéma **Figure 52** propose ainsi d'intégrer aux schémas d'évolutions classiques des paramètres liés à la maturation des baies de raisin Cabernet Franc, les courbes liées à l'élasticité et fermeté. Toutefois, avant d'être généralisés, ces résultats nécessitent d'être confirmés par l'analyse de l'évolution texturale d'autres variétés de raisin sur plusieurs millésimes et plusieurs parcelles.



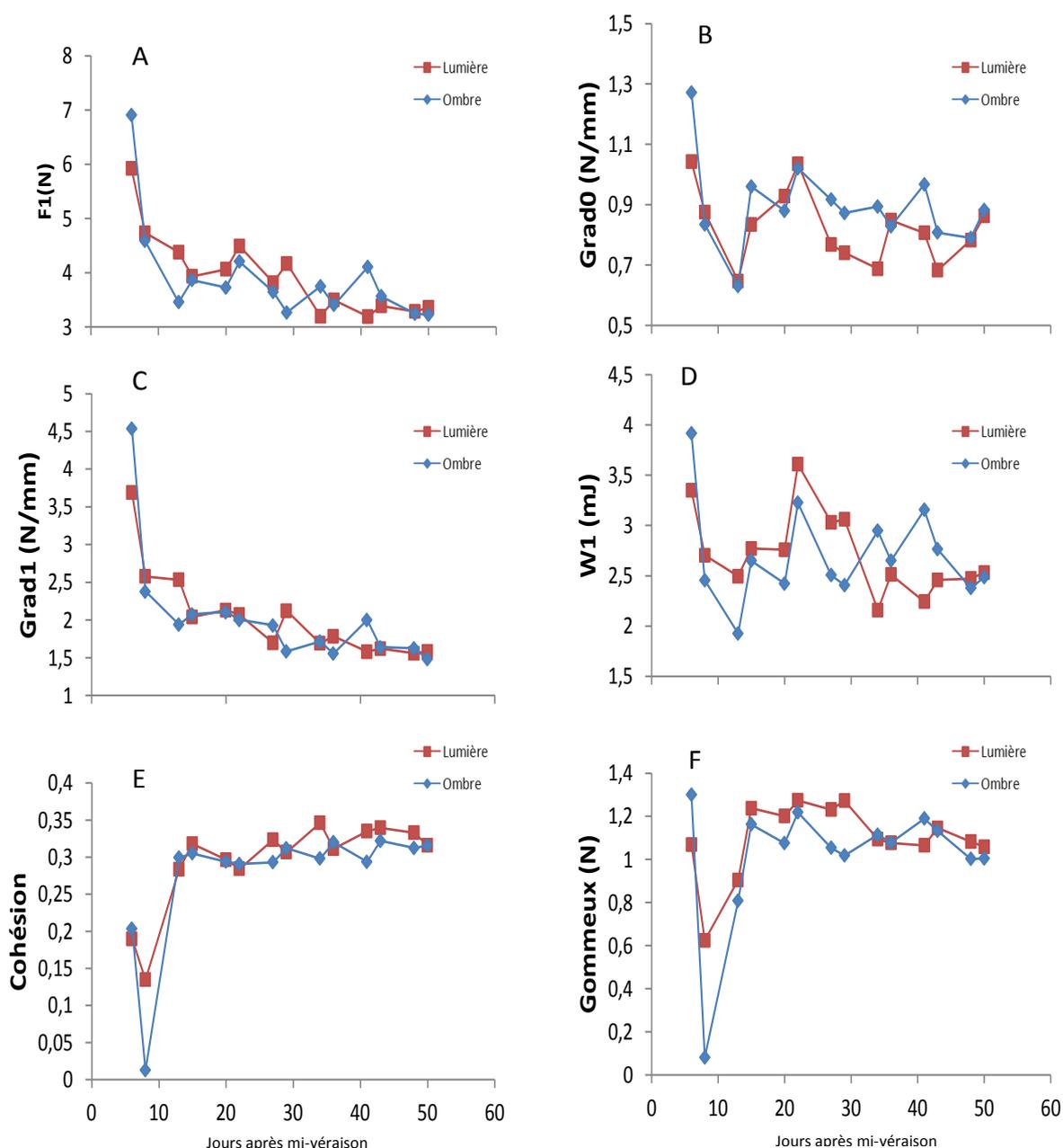
**Figure 52.** Evolution des composés d'intérêt majeurs au cours de la maturation d'après Rotter (2004) intégrant l'évolution de la maturité texturale pour la variété Cabernet Franc.

## II. Comparaison de l'évolution des paramètres de double compression en fonction de l'exposition

Les spécificités du millésime 2012 par rapport au millésime 2011 ont été montrées et les mêmes grandes tendances d'évolution des principaux paramètres étudiés entre les deux années sont retrouvées. A présent, nous nous intéressons spécifiquement à l'impact de l'exposition de la grappe sur l'évolution des propriétés mécaniques des baies de raisin. Les grappes de raisin étudiées ont soit effectué leur maturation entièrement à l'ombre (Om) ou entièrement à la lumière (Lu) selon le dispositif expérimental présenté dans le chapitre matériels et méthodes (**Figure 20**). L'exposition à la lumière des grappes influence

directement la quantité de radiation solaire captée par les baies ainsi que leur température. Cependant si des différences significatives sont observées en fonction de nos deux modalités (Om et Lu), le dispositif expérimental mené ici ne nous permettra pas de savoir si les résultats observés sont liés directement à l'influence de la température, de la radiation ou des deux facteurs combinés.

La **Figure 53** est une comparaison de l'évolution des paramètres de double compression en fonction du facteur exposition à l'ombre et à la lumière. Les résultats montrent des allures de courbes similaires entre les facteurs. Ainsi une grappe dont la croissance s'effectue entièrement à l'ombre durant la maturation ne modifie son type d'évolution mais uniquement son degré d'évolution. Des différences entre les courbes apparaissent dès les premières dates de prélèvement et nous verrons par la suite si ces différences sont statistiquement significatives. L'analyse des courbes des paramètres de texture, montre également une particularité qui n'avait pas été mise en évidence lors du millésime 2011. En effet les paramètres cohésion et gommeux, montrent en début de maturation une forte diminution des valeurs entre 6 et 8 jours après mi-véraison puis une forte augmentation jusqu'à 15 jours après mi-véraison. Ce début de courbe en « V » est retrouvé à la fois pour les grappes à l'ombre et à la lumière et ne s'explique pas par des conditions climatiques particulières, étant donné qu'aucun épisode pluvieux n'est enregistré durant cette période comme le montre les relevés de précipitations **Figure 53A**. Ce phénomène pourrait être une caractéristique générale de l'évolution de ces deux paramètres en début de maturation.



**Figure 53. Evolution au cours de la maturation des paramètres de double compression en fonction de l'exposition des grappes.**

Afin de mettre en évidence l'impact de l'exposition des grappes sur les paramètres étudiés, une ANOVA a été effectuée sur l'ensemble des données en séparant en deux la période de maturation (**Tableau 26**). Le début de maturation correspond aux dates comprises entre 6 et 29 jours après mi-véraison, la fin maturation correspond aux dates comprises entre 34 et 50 jours après mi-véraison. Cette séparation permet de savoir si l'effet exposition est le même tout au long de la maturation.

En début de maturation, les valeurs des paramètres liés à la fermeté, F1 et W1, sont plus élevées à l'ombre qu'à la lumière, bien que cette tendance ne soit significative que pour le paramètre W1. En revanche en fin de maturation, les deux paramètres montrent un effet exposition fort ( $p < 0,001$ ), mais cette fois-ci ce sont les valeurs à la lumière qui sont statistiquement supérieures à celles trouvées à l'ombre. Les écarts entre les deux modalités en fin de maturation sont de 5% pour le paramètre F1, et 11% pour le paramètre W1.

**Tableau 26. Analyse de variance des principaux paramètres physiques, physiologiques et texturaux en fonction de l'exposition des grappes, en début et fin de maturation. (Moyenne  $\pm$  erreur standard).**

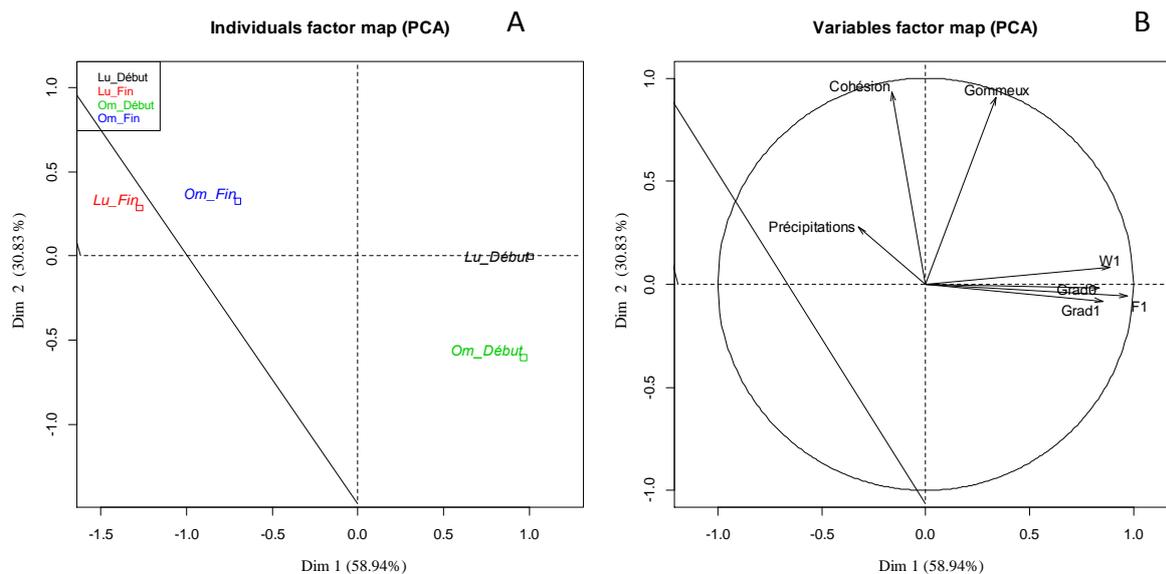
	Début maturation				Fin de maturation			
	Ombre	Lumière	F	p-value	Ombre	Lumière	F	p-value
F1 (N)	4,43 $\pm$ 0,07	4,49 $\pm$ 0,04	0,59	ns	3,50 $\pm$ 0,02	3,31 $\pm$ 0,02	39,93	***
W1 (mJ)	2,78 $\pm$ 0,05	2,96 $\pm$ 0,03	10,64	**	2,68 $\pm$ 0,02	2,38 $\pm$ 0,02	92,82	***
Grad0 (N/mm)	0,94 $\pm$ 0,02	0,88 $\pm$ 0,01	13,62	***	0,86 $\pm$ 0,01	0,78 $\pm$ 0,01	75,35	***
Grad1 (N/mm)	2,50 $\pm$ 0,05	2,42 $\pm$ 0,03	1,85	ns	1,64 $\pm$ 0,01	1,65 $\pm$ 0,01	0,04	ns
Cohésion	0,24 $\pm$ 0,01	0,26 $\pm$ 0,01	0,89	ns	0,31 $\pm$ 0,00	0,33 $\pm$ 0,00	106,89	***
Gommeux (N)	0,99 $\pm$ 0,02	1,09 $\pm$ 0,01	15,03	***	1,08 $\pm$ 0,01	1,09 $\pm$ 0,00	0,92	ns

**Significativité :  $p < 0,001$  \*\*\* ;  $p < 0,01$  \*\* ; ns= non significatif**

Un effet exposition fort est mis en évidence pour le paramètre Grad0 ( $p < 0,001$ ) à la fois en début et en fin de maturation, où les valeurs à l'ombre sont significativement supérieures que celles observées à la lumière. Les écarts entre les deux modalités pour le paramètre Grad0 sont de 6% en début de maturation et 9% en fin de maturation. Le paramètre Grad1 quant à lui ne présente aucun effet exposition significatif au cours de la maturation. En fin de maturation les baies ayant grandi à la lumière présentent une cohésion plus importante que celle dont la maturation s'est déroulée entièrement à l'ombre. Cette même tendance avait été observée en début de maturation mais les résultats n'étaient pas statistiquement significatifs. A l'inverse, c'est en début de maturation que le paramètre gommeux montre un effet exposition statistiquement significatif, alors qu'aucun effet exposition n'est mis en évidence pour ce paramètre en fin de maturation.

Les mêmes données ont été analysées par analyse en composante principale (ACP), pour les baies exposées à l'ombre ou à la lumière en début ou fin de maturation (**Figure 54**). Les deux

premières composantes expliquent 89,77% de la variance. En début de maturation la séparation des individus se fait essentiellement sur la deuxième composante influencée en grande partie par le paramètre Gommeux. La fin de la maturation qui est une période marquée par de forte précipitations montre une séparation entre les facteurs ombre et lumière sur la première composante principale qui est influencée par les variables liées à la fermeté (F1, W1) et l'élasticité (Grad0, Grad1) des baies.



**Figure 54. Résultats de l'analyse en composante principale (ACP) appliquées aux paramètres de double compression et le paramètre « précipitations ». A : positionnement des barycentres associés aux individus exposés à l'ombre ou la lumière en début ou fin de maturation (Om\_Début ; Om\_Fin ; Lu\_Début ; Lu\_Fin) ; B : positionnement des variables.**

### Impact de l'exposition sur la variabilité texturale intra grappe

Au cours du millésime 2011 des gradients de propriétés mécaniques ont été mis en évidence en fonction de la position de la baie sur la grappe. Afin de savoir si l'exposition des grappes au cours de la maturation peut avoir une influence sur ces gradients, des analyses de variances ont été réalisées sur les paramètres de double compression en fonction de la position de la baie sur la grappe, en début et en fin de maturation pour les deux modalités d'exposition des grappes étudiées. Les résultats de l'ANOVA sont présentés dans le Tableau 27. En début de maturation, tous les paramètres de double compression excepté le paramètre gommeux montrent un effet position significatif. Les paramètres liés à la fermeté (F1 et W1) ainsi que les paramètres liés à l'élasticité des baies (Grad0 et Grad1) montrent

des valeurs significativement supérieures en haut de grappe par rapport au bas de la grappe. Pour les grappes exposées à la lumière en début de maturation, il n’y a pas d’effet position mis en évidence pour les paramètres de double compression à l’exception du paramètre Grad0 ( $p < 0,001$ ). En revanche, comme en 2011 les grappes exposées à la lumière montrent un effet position significatif pour tous les paramètres de double compression en fin de maturation. Ces résultats confirment qu’*a priori* pour des grappes grandissant dans des conditions normales d’ensoleillement, les différences texturales entre les baies d’une même grappe s’accroissent avec l’avancement de la maturation. Mais qu’à l’inverse une absence d’ensoleillement direct des grappes conduit à une hétérogénéité texturale marquée des baies dès le début de la maturation.

**Tableau 27. Résultats de l’ANOVA des paramètres de double compression en fonction de la position des baies sur la grappe, en début et fin de maturation pour les deux modalités ombre et lumière. Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les moyennes (moyenne  $\pm$  erreur standard).**

Ombre									
	Début maturation				Fin maturation				
	Haut	Milieu	Bas	p-value	Haut	Milieu	Bas	p-value	
F1 (N)	4,50 $\pm$ 0,13 b	4,41 $\pm$ 0,13 b	3,94 $\pm$ 0,13 a	<0,01	3,46 $\pm$ 0,05 a	3,65 $\pm$ 0,05 b	3,50 $\pm$ 0,05 a	<0,05	
W1 (mJ)	2,83 $\pm$ 0,09 b	2,88 $\pm$ 0,09 b	2,49 $\pm$ 0,09 a	<0,01	2,67 $\pm$ 0,05 a	2,85 $\pm$ 0,05 b	2,67 $\pm$ 0,05 a	<0,05	
Grad0 (N/mm)	1,03 $\pm$ 0,03 b	0,95 $\pm$ 0,03 ab	0,82 $\pm$ 0,03 a	<0,001	0,87 $\pm$ 0,01 b	0,89 $\pm$ 0,01 b	0,81 $\pm$ 0,01 a	<0,001	
Grad1 (N/mm)	2,55 $\pm$ 0,10 b	2,42 $\pm$ 0,10 ab	2,18 $\pm$ 0,10 a	<0,05	1,63 $\pm$ 0,03 a	1,69 $\pm$ 0,03 a	1,65 $\pm$ 0,03 a	ns	
Cohésion	0,24 $\pm$ 0,01 a	0,24 $\pm$ 0,01 a	0,28 $\pm$ 0,01 b	<0,05	0,313 $\pm$ 0,002 b	0,305 $\pm$ 0,002 a	0,314 $\pm$ 0,02 b	<0,05	
Gommeux (N)	1,01 $\pm$ 0,03 a	1,00 $\pm$ 0,03 a	0,97 $\pm$ 0,03 a	ns	1,07 $\pm$ 0,01 a	1,11 $\pm$ 0,01 a	1,09 $\pm$ 0,01 a	ns	
Lumière									
	Début maturation				Fin maturation				
	Haut	Milieu	Bas	p-value	Haut	Milieu	Bas	p-value	
F1 (N)	4,58 $\pm$ 0,06 a	4,41 $\pm$ 0,07 a	4,50 $\pm$ 0,07 a	ns	3,22 $\pm$ 0,03 a	3,37 $\pm$ 0,03 b	3,36 $\pm$ 0,03 b	<0,001	
W1 (mJ)	3,02 $\pm$ 0,05 a	2,88 $\pm$ 0,05 a	2,98 $\pm$ 0,05 a	ns	2,33 $\pm$ 0,03 a	2,43 $\pm$ 0,03 b	2,40 $\pm$ 0,03 ab	<0,05	
Grad0 (N/mm)	0,92 $\pm$ 0,01 b	0,84 $\pm$ 0,01 a	0,86 $\pm$ 0,01 a	<0,001	0,79 $\pm$ 0,01 b	0,81 $\pm$ 0,01 b	0,75 $\pm$ 0,01 a	<0,001	
Grad1 (N/mm)	2,46 $\pm$ 0,05 a	2,41 $\pm$ 0,05 a	2,40 $\pm$ 0,05 a	ns	1,57 $\pm$ 0,02 a	1,69 $\pm$ 0,02 b	1,67 $\pm$ 0,02 b	<0,001	
Cohésion	0,25 $\pm$ 0,01 a	0,25 $\pm$ 0,01 a	0,25 $\pm$ 0,05 a	ns	0,329 $\pm$ 0,002 a	0,324 $\pm$ 0,002 a	0,336 $\pm$ 0,002 b	<0,001	
Gommeux (N)	1,09 $\pm$ 0,02 a	1,05 $\pm$ 0,02 a	1,08 $\pm$ 0,02 a	ns	1,05 $\pm$ 0,01 a	1,08 $\pm$ 0,01 b	1,12 $\pm$ 0,01 c	<0,001	

L'expérimentation menée dans ce chapitre cherchait spécifiquement à étudier l'impact du microclimat des grappes sur les propriétés mécaniques des baies au cours de la maturation. D'après le dispositif expérimental mis en place, les principales variations liées au système d'ombrage grappes impliquait les composantes du microclimat que sont la température et le niveau des radiations solaires perçus par les grappes.

Bien que les résultats montrés ne permettent pas de distinguer directement les effets liés à la température de ceux liés au niveau de radiation solaire, les différences significatives mises en évidence dans l'évolution des propriétés mécaniques des baies peuvent être attribuées à l'interaction de ces deux facteurs.

De nombreuses études se sont intéressées à l'impact de l'exposition des grappes et les conséquences du microclimat sur la composition en sucre et acides organiques (Smart et al, 1985 ; Ollat et al, 2002), ou encore sur la concentration en composés phénoliques (Dokoozlian et Kliewer, 1996 ; Haselgroge et al, 2000 ; Yamane et al, 2006 ; Cortell et Kennedy, 2006 ; Matus et al, 2009). Ici, les résultats de cette étude montrent que le microclimat des grappes influence significativement les propriétés mécaniques des baies, mises en évidence par des mesures de double compression. Les différences observées entre les deux facteurs sont d'autant plus importantes que l'on avance dans la maturation, où les paramètres liés à la fermeté des baies ont des valeurs plus élevées à l'ombre qu'à la lumière. L'ombrage des grappes induirait donc un retard dans la maturité texturale des baies. Cependant les différences observées entre le début et la fin de maturation ne peuvent pas entièrement être attribuées à l'effet exposition des grappes étant donné que les conditions climatiques et notamment de pluviométrie entre les deux périodes n'étaient pas similaires. En effet, la fin de maturation au cours du millésime 2012 a été marquée par de fortes précipitations (Annexe 4). Ce résultat va cependant dans le sens des travaux de Rebucci et al (1997) qui supposaient que l'influence de l'exposition et donc du microclimat des grappes pouvait moduler le statut hydrique et le flux d'eau via le pédicelle et la pellicule des baies. Cette modulation conduit à des différences en composés du métabolisme primaire comme les sucres et les acides organiques.

L'accumulation des anthocyanes dans les pellicules de raisin est positivement influencée par la température et les radiations selon les résultats des études citées précédemment. Ainsi, plus il y a de lumière plus il y a d'anthocyanes dans les pellicules. Nos résultats

montrent également un fort effet exposition pour le paramètre Grad0, dont on sait qu'il est lié à l'élasticité de la pellicule, et qui est plus faible à la lumière qu'à l'ombre. Ces deux comportements face à l'exposition vont dans le sens des travaux de Zouid et al (2010) qui ont montré que l'extractibilité des anthocyanes était inversement corrélée aux paramètres de textures en lien avec l'élasticité de la pellicule.

Concernant l'impact de l'exposition sur l'hétérogénéité intra-grappe, on remarque qu'en début de maturation six des sept paramètres de texture étudiés présentent un effet position significatif pour les grappes à l'ombre alors que pour les grappes exposées à la lumière, seul le paramètre Grad0 est significatif. Cette observation pourrait signifier que l'ombre est un facteur accentuant les différences texturales entre les baies d'une même grappe.

### **III. Conclusion**

Les principaux résultats de ce chapitre ont montré un fort effet microclimat sur les propriétés mécaniques des baies de raisin. L'exposition des grappes à la lumière par rapport à l'ombre entraîne une maturité texturale plus avancée. Le fait que les différences de texture entre grappes à l'ombre et à la lumière soient visibles dès les premières dates de prélèvement soulève la forte sensibilité au microclimat des mécanismes liés à l'évolution de la texture des baies. Pour une meilleure compréhension de l'impact du microclimat sur les propriétés mécaniques, il serait envisageable par la suite de quantifier séparément les effets liés à la température et à la quantité de radiation solaire en lien avec l'évolution de la texture. Cependant, ces premiers résultats concernant l'impact du macroclimat contribuent à une meilleure compréhension des facteurs pouvant induire une variabilité dans nos données de texture à l'instar des autres facteurs liés au physique, à la physiologie de la baie mais également de la position de la baie sur la grappe. Pour être complété, le choix du protocole d'échantillonnage dans le cadre d'un suivi de maturité texturale devra donc éviter le prélèvement des grappes trop ombragées, auxquels cas les résultats risquent d'être sous évalués par rapport à des grappes plus exposées.

## **Conclusion générale et perspectives**



## Conclusion générale et perspectives

Le nombre croissant d'études s'intéressant aux propriétés mécaniques des baies de raisins ces dernières années, montre l'intérêt grandissant de la filière envers ce nouveau critère de détermination de la qualité de la vendange. Les liens établis entre propriétés mécaniques et extraction des composés phénoliques, font de l'analyse de la texture un allier majeur de prédiction de la qualité à moindre coût, par des méthodes rapides et non destructives, comparé aux méthodes d'analyses classiques des composés phénoliques. Cependant dans le cadre d'un suivi de maturité texturale par mesure instrumentale, seules des tendances d'évolution plus ou moins significatives ont été mises en évidence ne permettant pas de définir de façon détaillée l'évolution des propriétés mécaniques des baies de raisin au cours de la maturation. Nous avons supposé que la non maîtrise de la variabilité des baies prélevées d'une date à l'autre, pouvait gommer les éventuels changements de propriétés mécaniques observables au cours de la maturation (en dehors des changements nets mis en évidence au moment de la véraison) (Le Moigne et al, 2008). L'objectif de ce travail de thèse était donc de mieux comprendre l'influence de facteurs majeurs liés à l'hétérogénéité physique, physiologique et environnementale, sur l'évolution et la variabilité des propriétés mécaniques des baies de raisin. La démarche adoptée a été dans un premier temps de sélectionner parmi cinq méthodes instrumentales de mesure de la texture (double compression 20%, compression 70%, pénétrométrie, traction sur pellicule et traction sur pédicelle), celle qui présentait le meilleur compromis de discrimination inter-variétal, intra-variétal et inter-date. Les lots de baies analysés étaient issus de parcelles de variétés Cabernet Franc et Chenin prélevées selon un protocole d'échantillonnage global.

Cette étude nous a d'abord permis de confirmer que les propriétés mécaniques des raisins diffèrent selon la variété. Ainsi, au niveau de la discrimination inter-variétal nos résultats suggéraient que les techniques plus ciblées sur la pellicule (pénétrométrie et traction sur pellicule) étaient plus efficaces pour différencier les deux variétés de Chenin et Cabernet Franc. Cette étude a aussi pu montrer que les propriétés mécaniques des variétés blanches et rouges de raisin de cuve étaient significativement différentes notamment par la résistance mécanique des pellicules qui est plus élevée pour la variété Cabernet Franc. Une des applications suite à ces résultats pourrait être l'étude du lien entre la différence de

sensibilité aux maladies cryptogamiques des raisins et les propriétés mécaniques en fonction de leur couleur.

Les comparaisons des propriétés mécaniques effectuées ont également montré que pour les deux variétés testées, la capacité de discrimination intra-variétale était plus efficace sur la variété Chenin.

Au niveau de la discrimination inter-dates les techniques sur baie entière, telles que la double compression 20% et la compression 70%, montrent des paramètres intéressants pour le suivi de maturité texturale. Au final c'est bien la technique instrumentale de double compression 20% qui présentait le meilleur compromis entre les trois niveaux de discrimination requis.

Une fois les capacités de discrimination de la technique de double compression démontrées, et le choix de la variété Cabernet Franc fait, la suite des travaux de thèse s'est porté sur la variabilité proprement dite des propriétés mécaniques des baies de raisin au cours de la maturation et de l'impact des paramètres physiques, physiologiques et environnementaux sur cette variabilité. Le choix du protocole d'échantillonnage était basé sur l'analyse de l'ensemble des baies d'une même grappe pour chaque date de prélèvement. L'évolution des paramètres de double compression a montré des changements significatifs au cours de la maturation pas uniquement entre des dates éloignées mais également entre des dates proches. Les paramètres F1, Grad0, Grad1, W1, et Gommeux diminuaient significativement alors que le paramètre cohésion augmentait. L'allure des courbes décroissantes n'était cependant pas la même selon les paramètres considérés. En effet, les paramètres liés à la fermeté, F1 et W1, montraient une courbe de décroissance sigmoïde avec un ralentissement en milieu de maturation, alors que le paramètre lié à l'élasticité, Grad1, a une courbe de décroissance exponentielle. Les résultats significatifs et répétables sur deux millésimes (2011 et 2012) obtenus nous permettent d'affirmer qu'il existe bien au cours de la maturation une évolution de la maturité texturale des baies comme cela avait été montré par analyse sensorielle par les travaux de Le Moigne et al (2008) et que celle-ci peut être mise en évidence de manière instrumentale par l'utilisation de la technique de double compression 20%. Le schéma **Figure 52** propose ainsi d'intégrer aux schémas d'évolutions classiques des paramètres liés à la maturation des baies de raisin Cabernet Franc, les courbes liées à

l'élasticité et fermeté. Toutefois, avant d'être généralisés, ces résultats nécessitent d'être confirmés par l'analyse de l'évolution texturale d'autres variétés de raisin sur plusieurs millésimes et plusieurs parcelles.

L'étude a également mis en évidence des corrélations positives entre la fermeté des baies et les paramètres liés à leur taille et les paramètres liés à l'eau. De plus, de fortes corrélations négatives ont été observées entre le paramètre F1 et les paramètres °Brix et densité. Nos résultats ici suggèrent qu'à maturité, les baies les plus molles contiennent moins d'eau, sont plus riches en sucre et sont plus petite en taille et en poids. L'établissement de modèles de régression pour la prédiction des paramètres de texture, a mis en évidence le rôle prépondérant des paramètres liés à l'eau dans l'évolution de la texture. Ces résultats soulignent l'intérêt de s'intéresser à des indicateurs précis de l'état hydrique de la vigne et des baies pouvant avoir un impact sur les propriétés texturales. La mesure de l'activité de l'eau ( $A_w$ ) des baies ou encore la mesure du potentiel hydrique foliaire des feuilles situées à proximité directe des grappes à analyser en parallèle aux mesures de propriétés mécaniques des baies pourraient être envisagées. De même l'analyse par HPLC de composés osmorégulateurs tels que les acides aminés libres et plus particulièrement la proline a fait l'objet d'une étude préliminaire au cours de cette thèse. Les baies issues d'une grappe à maturité ont été analysées en collaboration avec le laboratoire EGFV de l'institut des sciences des vignes et du vins de Bordeaux. La relation entre les mesures de propriétés mécaniques et la présence de composés osmorégulateurs nécessite cependant un plus grand nombre d'échantillons devrait faire l'objet d'une étude à part entière.

Une originalité de ce travail de thèse a été de vérifier l'hétérogénéité physique, physiologique et texturale lié à la position de la baie sur la grappe. Un premier gradient positif du haut vers le bas de la grappe, a montré que les baies situées en haut de grappes étaient statistiquement plus fermes avec une proportion d'eau plus importante que celles situées en bas de grappe. A l'inverse, le second gradient négatif montrait que les baies situées en bas de grappes étaient plus ramollies et présentaient des valeurs de paramètres liés aux sucres (densité, °Brix) plus élevées. Il a été également montré que les contraintes liées au microclimat de la grappe avaient des conséquences sur la maturité texturale des

baies au même titre que la maturité technologique ou phénolique. D'autres études sont nécessaires pour mieux comprendre l'impact du climat sur la mesure des propriétés mécaniques au cours de la maturation comme des facteurs liés aux caractéristiques du sol, la contrainte hydrique ou encore les pratiques culturales.

La prise en compte de l'ensemble de ces facteurs physiques, physiologiques et environnementaux ne pouvait donc pas être négligée lors des protocoles d'échantillonnage destiné à un suivi de maturité texturale. C'est pourquoi l'étude de la variabilité intra-grappe et les différences significatives observées entre les positions extrêmes de la grappe nous a conduit à proposer une stratégie de protocole d'échantillonnage adapté à un suivi de la maturité texturale, représentatifs et répétables d'une date à l'autre. La récolte de grappes entières permet de couvrir une large variabilité texturale, mais nous avons également montré que l'échantillonnage des baies issues du milieu de la grappe était comparable à celui d'une grappe entière. Ainsi dans le cadre d'un suivi de maturité texturale, les résultats de ce travail suggèrent le choix d'un protocole d'échantillonnage basé sur l'analyse des baies situées dans le tiers milieu de la grappe. L'analyse des propriétés mécaniques des raisins permet un large potentiel d'études multi-échelles et multicritères cependant il est nécessaire de pouvoir comparer les résultats d'une étude à l'autre ce qui passe par une harmonisation des protocoles opératoires et des identifications des paramètres mécaniques utilisés.

La texture deviendrait donc un critère complémentaire d'estimation de la qualité des raisins (comme c'est déjà le cas pour d'autres fruits comme la pomme ou la tomate), au même titre que les critères classiques d'évaluation de la qualité technologique et phénolique.

## **Références bibliographiques**



## Références bibliographiques

- **Abbott, J. A. 1999.** Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology* 15 : 207-225.
- **Alleweldt, G., M. Engel et H. Gebbing. 1981.** Histologische untersuchungen an weinbeeren. *Vitis* 20 : 1-7.
- **Amrani Joutei, K. et Y. Glories. 1994.** Etude en conditions modèles de l'extractibilité des composés phénoliques des pellicules et des pépins de raisins rouges. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 28 : 303-317.
- **Amrani Joutei, K. et Y. Glories. 1995.** Tannins et anthocyanes : localisation dans la baie de raisin et mode d'extraction. *Revue française d'œnologie*, 153. Article technique.
- **Asselin, C. et F. F. Ballester. 1992.** Une caractérisation polyphénolique des raisins et des vins de Cabernet Franc : importance de l'effet terroir. *Progrès Agricole et Viticole* 18 : 11-127.
- **Attia, F. 2007.** Effet du stress hydrique sur le comportement écophysologique et la maturité phénolique de la vigne *Vitis vinifera* L. : étude de cinq cépages autochtones de midi Pyrénées. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
- **Barbeau, G., Y. Cadot, L. Stevez, M.H. Bouvet, M. Cosneau, C. Asselin et A. Mege. 2004.** Qualité de la baie et typicité de vins de chenin en relation avec les conditions du milieu. Université du Chenin, Fontevraud Val de Loire, 22 au 25 juin 2004.
- **Barbeau, G. 2008.** Influence du fonctionnement de la vigne sur la qualité du vin. VI Foro Mundial del Vino, Logroño-Espagne, 22-24 avril 2008.
- **Bargel, H., H. C. Spatz, T. Speck et C. Neinhuis. 2004.** Two-dimensional tension tests in plant biomechanics-sweet cherry fruit skin as a model system. *Plant Biol.* 6 : 432-439.
- **Bellincontro, A., I. Nicoletti, M. Valentini, A. Tomas, D. De Santis, D. Corradini et F. Mencarelli. 2009.** Integration of nondestructive techniques with destructive analyses to study postharvest water stress of winegrapes. *Am J. Enol. Vitic.* 60: 57-65.

- **Bertin, N., M. Buret et C. Gary. 2001.** Insights into the formation of tomato quality during fruit development. *J. Hort. Sci and Biotech.* 76 : 786-792.
- **Bidlack, J., M. Malone et R. Benson. 1992.** Molecular structure and component integration of secondary cell walls in plants. *Proceedings of Oklahoma Academy of Sciences* 72 : 51-56.
- **Blahovec, J. 1994.** Elastic and strength properties of round agricultural products. *Int. Agrophysics* 8 : 543-546.
- **Blouin, J. et G. Gimberteau. 2000.** Maturation et maturité des raisins. Editions Féret.
- **Bodin, F. 2003.** Contribution à l'étude du terroir viticole en Anjou. Thèse de Doctorat. Université d'Angers, France.
- **Bohner, J. et F. Bangerth. 1988.** Effects of fruit set sequence and defoliation on cell number, cell size and hormone levels of tomato fruits (*Lycopersicon esculentum Mill.*) within a truss. *Plant Growth Regul.* 7 : 141-155.
- **Bondada, B. R., M.A. Matthews, K.A. Shackel. 2005.** Functional xylem in the post veraison grape berry. *J. Exp. Bot.* 56 : 2949-2957.
- **Borie, B., P. Jeandet, A. Parize, R. Bessis et M. Adrian. 2004.** Resveratrol and stilbene synthase mRNA production in grapevine leaves treated with biotic and abiotic phytoalexin elicitors. *Am. J. Vitic. Enol.* 55 : 60-64.
- **Boss, P. K. et C. Davies. 2001.** Molecular biology of sugar and anthocyanin accumulation in grape berries. In *Molecular Biology and biotechnology of the grapevine*. Springer Netherlands: 1-33.
- **Bourne, M.C. 2002.** Physics and texture. *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. SL Taylor, ed. Academic Press. (ed.), pp 59-106. San Diego, CA.
- **Bruce, D.M. 2003.** Mathematical modeling of the cellular mechanics of plants. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 358 : 1437-1444.
- **Brummel, D. A. et M. H. Harpster. 2001.** Cell wall metabolism in fruit softening and quality and its manipulation in transgenic plants. In: *Plant Cell Walls*. Springer Netherlands 311-340.
- **Cadot, Y., M. T. Mañana-Castello et M. Chevalier. 2006.** Anatomical, histological, and histochemical changes in grape seeds from *Vitis vinifera L.* cv Cabernet Franc during fruit development. *J. Agri. Food Chem.* 54 : 9206-9215.

- **Calo, A., D. Tomasi, M. Crespan et A. Costacurta. 1996.** Relationship between environmental factors and dynamics of growth and composition of the grapevine. *Acta Horticulturae* 427 : 217-232.
- **Carbonneau, A., A. Moueix, N. Leclair et J. L. Renoux. 1991.** Proposition d'une méthode de prélèvement de raisins à partir de l'analyse de l'hétérogénéité de maturation sur un cep. *Bulletin de l'OIV* 64 : 679-690.
- **Carbonneau, A., C. Riou, D. Guyon, J. Riom et C. Schneider. 1992.** Agrométéorologie de la vigne en France. Luxembourg, Office des publications officielles des Communautés Européennes, 165p.
- **Carbonneau, A., A. Deloire et B. Jaillard. 2007.** La Vigne. Physiologie, terroir culture. Dunod, Paris.
- **Carpita, N. C. et D. M. Gibeaut. 1993.** Structural models of primary cell walls in flowering plants: Consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth. *Plant J.* 3 : 1-30.
- **Cause, M., M. Buret, K. Robini et P. Verschave. 2003.** Inheritance of nutritional and sensory quality traits in fresh market tomato and relation to consumer preferences. *J. Food Sci.* 68 : 2342-2350.
- **Chaib, J., M. F. Devaux, M. G. Grotte, K. Robini, M. Cause, M. Lahaye et I. Marty. 2007.** Physiological relationships among physical, sensory, and morphological attributes of texture in tomato fruits. *J. Exp. Bot.* 58 : 1915-1925.
- **Chardonnet, C. 1994.** Le calcium de la baie de raisin: relation entre la cohésion des parois cellulaires et la sensibilité a botrytis cinerea. Thèse de Doctorat. Université Bordeaux 2, France.
- **Chatelet, D. S., T. L. Rost, K. A. Shackel et M. A. Matthews. 2008.** The peripheral xylem of grapevine (*Vitis vinifera*): Structural integrity in post-veraison berries. *J. Exp. Bot.* 59 : 1987-1996.
- **Cleland, R. E. 1971.** Cell wall extension. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 22 : 197-122.
- **Conde, C., P. Silva, N. Fontes, A. C. P. Dias, R. M. Tavares, M. J. Sousa et H. Geros. 2007.** Biochemical changes throughout grape berry development and fruit and wine quality.

- **Coombe, B. G. 1960.** Relation of growth and development to changes in sugar, auxins and gibberellins in fruits of seeded and seedless varieties of *Vitis vinifera*. *Plant Physiol.* 35: 241-250.  
**Coombe, B. G. 1973.** The regulation of set and development in the grape berry. *Acta Horticulturae* 34 : 261-273.
- **Coombe, B. G. et P. E. Phillips. 1982.** Development of the grape berry. III. Compositional changes during veraison measured by sequential hypodermic sampling. *In Proceedings of the UCD Grape and Wine Centennial Symposium (ed.)*, pp 132-136. University of California, Davis.
- **Coombe, B. G., M. Bovio et A. Schneider. 1987.** Solute accumulation by grape pericarp cells V. Relationship to berry size and the effect of defoliation. *J. Exp. Bot.* 38 : 1789-1798.
- **Coombe, B. G. et M. G. McCarthy. 2000.** Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Aust. J. Grape and Wine Res* 6 : 131-135.
- **Cortell, J. M. et J. A. Kennedy. 2006.** Effect of shading on accumulation of flavonoid compound in (*Vitis vinifera* L.) Pinot Noir fruit and extraction in a model system. *J. Agri. Food Chem.* 54 : 8510-8520.
- **Deloire, A. 2007.** [www.obs-viti-cg34.com/viti/download\\_file.jsp?id\\_doc=1016](http://www.obs-viti-cg34.com/viti/download_file.jsp?id_doc=1016)
- **Deng, Y., Y. Wu et Y. Li. 2005.** Effects of high O<sub>2</sub> levels on post-harvest quality and shelf life of table grapes during long-term storage. *Eur. Food Res. Technol.* 221 : 392-397.
- **Desseigne, J. M., M. Crochon, J. M. Roger, J. F. Ballester, J. C. Boulet, J. Mazzolier et C. Toussaint. 2003.** Spectrométrie proche infra-rouge et appréciation de la qualité de la vendange. *In : Eurovit : Proceedings : Contributed papers-abstracts Oct ; Montpellier, France.*
- **Diakou, P. et J. P. Carde. 2001.** In situ fixation of grape berries. *Protoplasma* 218 : 225-235.
- **Dokoozlian, N.K. et W.M. Kliewer. 1996.** Influence of light on grape berry growth and composition varies during fruit development. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121 : 869-874.

- **Dokoozlian, N. K. 2002.** Table grape growth and development: A review. Grape notes March-April : 2-4.
- **Downey, M. O., J. S. Harvey et S. P. Robinson. 2004.** The effect of bunch shading on berry development and flavonoid accumulation in Shiraz grapes. Austr. J. Grape Wine Res. 10 : 55-73.
- **Dufourcq, T. 2006.** Incidences du climat, du sol, de la date de récolte sur le potentiel aromatique du cépage Colombard en Gascogne. In: Proceeding of the VI<sup>th</sup> International terroir congress, Bordeaux-Montpellier, Juin 391-395.
- **Dupuch, V. 1997.** Entretien des sols viticoles et conséquences œnologiques. Progrès Agricole et Viticole 114 : 152-156.
- **Ebadi, A., P. May, M. Sedgley et B.G. Coombe. 1995.** Effect of low temperature near flowering time on ovule development and pollen tube growth in the grapevine (*Vitis vinifera* L.), cvs Chardonnay and Shiraz. Aust. J. Grape Wine Res. 1 : 11-18.
- **Ebadi, A., J. Erfani Moghadam et R. Fatahi. 2009.** Evolution of 22 population achieved from controlled crossing between some seeded x seedless grapevines cultivars. Sci. Hortic. 119 : 371-376.
- **E.N.T.A.V. 1995.** Catalogue de variétés et clones de vigne cultivés en France. Etablissement National Technique pour l'Amélioration de la viticulture. Le Grau du Roi, France.
- **Ewart, A. et W.M. Kliewer. 1977.** Effects of controlled day and night temperatures and nitrogen on fruit set, ovule fertility and fruit composition of several wine grape cultivars. Am. J. Enol. Vitic. 28 : 88-95.
- **Failla, O., L. Brancadoro et A. Scienza. 2005.** Murazione, maturità e qualità dell'uva. L'Informatore Agrario 14 : 7-13.
- **Flanzy, C. 1998.** Œnologie. Fondements scientifiques et technologiques. Paris: Lavoisier.
- **Fournand, D., A.Vincens, L. Sidhoum, J.M. Souquet, M. Moutounet et V. Cheyrier. 2006.** Accumulation and extractability of grape skin tannins and anthocyanins at different advanced physiological stages. J. Agri. Food Chem. 54 : 7331-7338.
- **Friedman, H. H., J. E. Whitney et A. S. Szczesniak. 1963.** The texturometer a new instrument for objective texture measurement. J. Food Sci. 28 : 390-396.

- **Fry S.C., R. C. Smith, K. F. Renwick, D. J. Martin et S. K. Hodge. 1992.** Xyloglucan endotransglycosylase, a new wall-loosening enzyme activity from plant. *Biochem. J.* 282 : 821-828.
- **Galet, P. 1998.** Cépages et vignobles de France. Vol 2 L'ampélographie française, Déhan, Montpellier Gallet P.
- **Galet, P. 2000.** Dictionnaire encyclopédique des cépages. Hachette.
- **Glories, Y., 2001.** Caractérisation du potentiel phénolique: adaptation de la vinification. *Progrès Agricole et Viticole* 118 : 347-350.
- **Greenspan, M.D., Schultz, H.R. et Matthews, M.A. 1996.** Field evaluation of water transport in grape berries during water deficits. *Physiol. Plant.* 97 : 55-62.
- **Greve, L. C., K. A. Shackel, H. Ahmdi, R. N. McArdle, J. R. Gohlke et J. M. Labavitch. 1994.** *J. Agri. Food Chem.* 42 : 2896-2899.
- **Grotte, M., Y. Cadot, A. Poussier, D. Loonis, E. Pietri, F. Duprat et G. Barbeau. 2001.** Détermination du degré de maturité des baies de raisin par des mesures physiques : aspects méthodologiques. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 35 : 87-98.
- **Goulao, L.F. et C.M. Oliveira. 2008.** Cell wall modifications during fruit ripening: When a fruit is not the fruit. *Trends Food Sci. Technol.* 19 : 4-25.
- **Hawker, J. S. 1969.** Changes in the activities of enzymes concerned with sugar metabolism during the development of grape berries. *Phytochemistry* 8 : 9-17.
- **Hall, A., J. P. Louis et D. W. Lamb. 2001.** A method for extraction detailed information from high resolution image of vineyards. *Proceeding of the 6<sup>th</sup> International conference of Geo computation, University of Queensland, Brisbane.*
- **Heredia, A. 2003.** Biophysical and biochemical characteristics of cutin, a plant barrier polymer. *Biochem. Biophys. Acta* 1620 : 1-7.
- **Hiroyuki, M., E. Yuda et S. Nakagawa. 1979.** Physiological studies on the ripening Delaware grapes. I. Effects of number of leaves and changes in polysaccharides or organic acids on sugar accumulation in the berries. *J. Jap. Soc. Hort. Sci.* 48 : 9-18.
- **Huang X. M., H. B. Huang et H. C. Wang. 2005.** Cell wall of loosening skin in post-veraison grape berries lost structural polysaccharides and calcium while accumulate structural proteins. *Sci. Hort.* 104 : 249-263.

- **Huber D. J. 1983.** The role of cell wall hydrolase in fruit softening. *Hortic. Review* 5 : 189-219.
- **Huglin, P. et C. Schneider. 1998.** *Biologie et écologie de la vigne*. 2 éd. Paris: Lavoisier & Doc.
- **Ilker, R. et A. S. Szczesniak 1990.** Structural and chemical bases for texture of plant foodstuffs. *J. Text. Stud.* 21 : 1-36.
- **Jullien, A., E. Malezieux, N. Michaux-Ferriere, M. Chillet et B. Ney. 2001.** Within-bunch variability in banana fruit weight: Importance of developmental lag between fruits. *Ann. Bot-London* 87 : 101-108.
- **Karathanos, V. T., A. E. Kostaropoulos et G. D. Saravacos. 1994.** Viscoelastic properties of raisins. *J. Food Eng.* 23 : 481-490.
- **Keller M., J. P. Smith et B. R. Bondada. 2006.** Ripening grape berries remain hydraulically connected to the shoot. *J. Exp. Bot.* 57 : 2577-2587.
- **Kennedy, J. A., M. A. Matthews et A. L. Waterhouse. 2000.** Changes in grape seed polyphenols during fruit ripening. *Phytochem.* 55 : 77-85.
- **Kennedy, J. 2002.** Understanding grape berry development. *Practical Winery & Vineyard*.
- **Kliewer, W. M. et R. E. Torres. 1972.** Effect of control day and night temperature on grape coloration. *Am J. Enol. Vitic.* 23 : 71-76.
- **Kontoudakis, N., M. Esteruelas, F. Fort, J. M. Canals, V. De Freitas et F. Zamora. 2011.** Influence of the heterogeneity of grape phenolic maturity on wine composition and quality. *Food Chem.* 124 : 767-774.
- **Krasnow M., M. A. Matthews, K. Shackel. 2008.** Evidence for substantial maintenance of membrane integrity and cell viability in normally developing grape (*Vitis vinifera* L.) berries throughout development. *J. Exp. Bot.* 59 : 849-859.
- **Lamadon, F. 1995.** Protocole pour l'évaluation de la richesse polyphénolique des raisins. *Revue des œnologues* 76 : 37-38.
- **Lamuela-Raventos, R. M. et A. L. Waterhouse. 1994.** A direct HPLC separation of wine phenolics. *Am. J. Vitic. Enol.* 45 : 1-5.
- **Lang A. et H. Düring. 1991.** Partitioning control by water potential gradient: Evidence for compartmentation breakdown in grape berries. *J. Exp. Bot.* 42 : 1117-1122.

- **Lecas M. et J. M. Brillouet. 1994.** Cell wall composition of grape berry skins. *Phytochemistry* 35 : 1241-1243.
- **Lee, C. Y. et M. C. Bourne. 1980.** Changes in grape firmness during maturation. *J. Text. Stud.* 11 : 163-171.
- **Le Moigne M. 2008.** Recherche de mesures innovantes pour suivre la qualité du raisin de Cabernet Franc pendant sa maturation. Thèse de doctorat, Université d'Angers, France.
- **Le Moigne, M., C. Maury, D. Bertrand, et F. Jourjon. 2008.** Sensory and instrumental characterization of Cabernet Franc grapes according to ripening stages and growing location. *Food Qual. Pref.* 19 : 220-331.
- **Letaief, H. 2007.** Application of a chemical-physical and mechanical tests for the definition of wine grape quality. Thèse de doctorat, Università degli studi di Torino. Italie.
- **Letaief, H., L. Rolle, G. Zeppa et V. Gerbi. 2008b.** Assessment of the grape skin hardness by puncture test. *J. Sci. Food Agr.* 88 : 1567-1575.
- **Letaief, H., L. Rolle et V. Gerbi. 2008a.** Mechanical behavior of wine grapes under compression tests. *Am. J. Vitic. Enol.* 59 : 323-329.
- **Lu, R. et G. Serrero. 1999.** Resveratrol, a natural product derived from grape exhibits antiestrogenic activity and inhibits the growth of human breast cancer cells. *J. Cell. Physiol.* 179 : 297-304.
- **Matas, A. J., E. D. Cobb, J. A. Bartsch, D. J. Paolillo, K. J. Niklas. 2004.** Biomechanics and anatomy of *Lycopersicon esculentum* fruit peels and enzyme-treated samples. *Am. J. Bot.* 91 : 352-360.
- **Matus, J. T., R. Loyola, A. Vega, A. Pena-Neira, E. Bordeu, P. Arce-Johnson et J. A. Alcade. 2009.** Post-veraison sunlight exposure induces MYB-mediated transcriptional regulation of anthocyanin and flavonol synthesis in berry skins of *Vitis vinifera*. *J. Exp. Bot.* 60 : 853-867.
- **Matthews M. A., T. R. Thomas et K. A. Shackel. 2009.** Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: Possible relation of veraison to turgor and berry softening. *Aust. J Grape Wine Res.* 15 : 278-283.

- **Maury C., E. Madieta, M. Le Moigne, E. Mehinagic, R. Siret et F. Jourjon. 2009.** Development of a mechanical texture test to evaluate the ripening process of Cabernet Franc. *J. texture Stud.* 40 : 511-535.
- **Mehinagic, E., G. Royer, R. Symoneaux, D. Bertrand et F. Jourjon. 2004.** Postharvest Biol. Technol. 34 : 257-269.
- **Nature Publishing Group. 2008.**  
[http://www.nature.com/nrg/journal/v9/n6/fig\\_tab/nrg2336\\_F1.html](http://www.nature.com/nrg/journal/v9/n6/fig_tab/nrg2336_F1.html)
- **Neethling E., 2010.** Relation entre le milieu physique et la qualité des raisins dans le Val de Loire, évolution et perspective dans un contexte de changement climatique. Mémoire de fin d'études, École Supérieure d'Agriculture d'Angers.
- **Nunan K.J., I. M. Sims, A. Bacic, S. P. Robinson et G. B. Fincher. 1997.** Isolation and characterization of cell walls from mesocarp of mature grape berries (*Vitis vinifera*). *Planta* 203 : 93-100.
- **Nuan K. J., I. M. Sims, A. Bacic, S. P. Robinson et G. B. Fincher. 1998.** Changes in cell-wall composition during ripening of grape berries. *Plant Physiol.* 118 : 783-792.
- **Ohnishi, S., T. Fuji et O. Miyawaki. 2003.** Freezing injury and rheological properties of agricultural products. *Food Sci. Technol. Res.* 9 : 367-371.
- **Ojeda, H., A. Deloire, A. Carbonneau, A. Ageorges et C. Romieu. 1999.** Berry development of grapevines: relations between the growth of berries and their DNA content indicate cell multiplication and enlargement. *Vitis* 38 : 145-150.
- **Ojeda, H., C. Andary, E. Kraeva, A. Carbonneau et A. Deloire. 2002.** Influence of pre- and postveraison deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *Am. J. Enol. Vitic.* 53 : 261-267.
- **Ollat, N., P. Diakou-Verdin, J. P. Carde, F. Barrieu, J. P. Gaudillere et A. Moing. 2002.** Grape berry development: a review. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 36 : 109-131.
- **Pagay, V. et L. Cheng. 2010.** Variability in berry maturation of Concord and Cabernet Franc in cool climate. *Am. J; Enol. Vitic.* 61 : 61-67.
- **Pasquini D., 2002.** Le Chenin, Itinéraires agroviticoles et œnologiques. Synthèse Bibliographique et expérimentale. ITV Val de Loire

- **Palomo, E. S., M. C. Diaz-Martoto, M. A. Vinas, A. Soriano-Pérez et M. S. Pérez Coello. 2007.** Aroma profile of wines from Albillo and Muscat grape varieties at different stages of ripening. *Food control* 18 : 398-403.
- **Pinelo M., A. Arnous et A. S. Meyer. 2006.** Upgrading of grape skins: Significance of plant cell wall structural components and extraction techniques for phenol release. *Trends in Food Science & Technology* 17 : 579-590.
- **Possner, D. R. E. et W. M. Kliewer. 1985.** The localization of acids, sugars, potassium and calcium in developing grape berries. *Vitis* 24 : 229-240.
- **Rebucci B., S. Poni, C. Intrieri, E. Magnanini et A.N. Lakso. 1997.** Effects of manipulated grape berry transpiration on post-veraison sugar accumulation. *Austr. J. Grape Wine Res.* 3 : 57-65.
- **Ribéreau-Gayon, P. et E. Stonestreet. 1965.** Le dosage des anthocyanes dans le vin rouge. *Bull. Soc. Chem.* 9 : 26-49
- **Ribéreau-Gayon, P., E. Peynaud. 1971.** The grape. The biochemistry of fruits and their products 2 : 171-205.
- **Rio Segade, S., L. Rolle, V. Gerbi et I. Orriols. 2008.** Phenolic ripeness assessment of grape skin by texture analysis. *J. Food Comp. Anal.* 21 : 644-649.
- **Rio Segade, S., S. Giacosa, V. Gerbi et L. Rolle. 2011a.** Berry skin thickness as main texture parameter to predict anthocyanin extractability in winegrape. *LWT-Food Sci. Technol.* 44 : 392-398.
- **Robin, J. P., P. Abbal et J. M. Salmon. 1997.** Fermeté et maturation du raisin. Définition et évolution de différents paramètres rhéologiques au cours de la maturation. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 31 : 127-138.
- **Roby, G. et M. A. Matthews. 2004.** Relative proportions of seed, skin and flesh, in ripe berries from Cabernet Sauvignon grapevines grown in a vineyard either well irrigated or under water deficit. *Aust. J. Grape Wine Res.* 10 : 74-82.
- **Rogiers, S. Y., J. M. Hatfield, V. Gunta Jaudzems, R. G. White et M. Keller. 2004.** Grape berry cv Shiraz epicuticular wax and transpiration during ripening and preharvest weight loss. *Am. J. Enol. Vitic.* 55 : 121-127.

- **Rojas, A. M., M. A. Castro, S. M. Alzamora et L. N. Gerschenson. 2001.** Turgor Pressure Effects on Textural Behavior of Honeydew Melon. *JFS: Food Eng. Phys Prop* 66 : 11-117.
- **Rolle, L., F. Torchio, S. Giacosa et V. Gerbi. 2009a.** Modifications of mechanical characteristics and phenolic composition in berry skins and seeds of Mondeuse winegrapes throughout the on vine drying process. *J. Sc. Food Agric.* 89 : 1973-1980.
- **Rolle, L., F. Torchio, G. Zeppa et V. Gerbi. 2009b.** Relations between break skin force and anthocyanin extractability at different stages of ripening. *Am. J. Enol. Vitic.* 60 : 93-97.
- **Rolle, L., F. Torchio, E. Cagnasso et V. Gerbi. 2010.** Evolution of mechanical variables of winegrapes for icewine production during on-vine drying. *Ital. J. Food Sc.* 22 : 143-149.
- **Rolle, L., S. Giacosa, V. Gerbi et V. Novello. 2011c.** Comparative study of texture properties, color characteristics and chemical composition of ten white table grape varieties. *Am. J. Enol. Vitic.* 62 : 49-56.
- **Rolle, L., R. Siret, S. Río Segade, C. Maury, V. Gerbi et F. Jourjon. 2012.** Instrumental texture analysis parameters as markers of table-grape and wine grape quality: A review. *Am. J. Enol. Vitic.* 63 : 11-28.
- **Rolle, L., F. Torchio, A. Ferrandino et S. Guidoni. 2012b.** Influence of wine-grape skin hardness on kinetics of anthocyanin extraction. *Int. J. Food Prop.* 15 : 249-261.
- **Rotter, B. 2004.** <http://www.brsquared.org/wine/>.
- **Sajnín, C., G. Gamba, L. N. Gerschenson et A. M. Rojas. 2003.** Textural, histological and biochemical changes in cucumber (*Cucumissativus* L.) due to immersion and variation in turgor pressure. *J. Sci. Food Agr.* 83 : 731-740.
- **Roudot, A. C. 2002.** Rhéologie et analyse de texture des aliments. Paris : Lavoisier.
- **Sato, A., M. Yamada, H. Iwanami et N. Mitani. 2004.** Quantitative and instrumental measurement of grape flesh texture as affected by gibberellic acid application. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 73 : 7-11.
- **Schneider, R., A. Razungles, F. Charrier et R. Baumes. 2002.** Effet du site de la maturité et de l'éclaircissement des grappes sur la composition aromatique des baies de

*Vitis vinifera* L. cv Melon B dans le vignoble du Muscadet. Bulletin de l'OIV. 75 : 269-283.

- **Serrano-Megias M. et J. M. Lopez-Nicolas. 2006.** Application of agglomerative hierarchical clustering to identify consumer tomato preferences: influence of physicochemical and sensory characteristics on consumer response. *J. Sci. Food Agri.* 86 : 493–499.
- **Shackel, K. A., Greve C., Labavitch J. M. et H. Ahmdi. 1991.** Cell turgor changes associated with ripening in tomato pericarp tissue. *Plant Physiol.* 97 : 814-816.
- **Silacci, M. W. et J. C. Morrison. 1990.** Changes in pectin content of Cabernet Sauvignon grape berries during maturation. *Am. J. Enol. Vitic.* 41 : 111-115.
- **Spayd, S. E., J. M. Tarara, D. L. Mee et J. C. Ferguson. 2002.** Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot berries. *Am. J. Enol. Vitic.* 53 : 171-182.
- **Szczesniak, A. S. 2002.** Texture is a sensory property. *Food Qual. Pref.* 13 : 15-25.
- **Tarara, J. M., J. Lee, S. E. Spayd et C. F. Scagel. 2008.** Berry temperature and solar radiation alter acylation, proportion, and concentration of anthocyanin in Merlot grapes. *Am. J. Enol. Vitic.* 53 : 171-182.
- **Thomas R. T., M. A. Matthews et K. A. Shackel. 2006.** Direct in situ measurement of cell turgor in grape (*Vitis vinifera* L.) berries during development and in response to plant water deficits. *Plant Cell Environment* 29 : 993-1001.
- **Thomas R.T., K.A. Shackel et M.A. Matthews. 2008.** Mesocarp cell turgor in *Vitis vinifera* L. berries throughout development and its relation to firmness, growth, and the onset of ripening. *Planta* 228 : 1067-1076.
- **Tong C., D. Krueger, Z. Vickers, D. Bedford, J. Luby, A. El-Shiekh, K. Shackel et H. Ahmadi. 1999.** Comparison of Softening-related changes during storage of 'Honeycrisp' apple, its parents, and 'Delicious'. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 124 : 407-415.
- **Torchio F., E. Cagnasso, V. Gerbi et L. Rolle. 2010.** Mechanical properties, phenolic composition and extractability indices of Barbera grapes of different solids contents from several growing areas. *Anal. Chim. Acta* 660 : 183-189.
- **Tu, K., J. De Baerdemaeker, R. Deltour et T. De Barssy. 1996.** Monitoring post-harvest quality of Granny Smith apple under simulated shelf life conditions:

- destructive, nondestructive and analytical measurements. *Int. J. Food Sci. Tech.* 31 : 267-276.
- **Tunick, M. H. 2011.** Food texture analysis in the 21<sup>st</sup> century. *J. Agric. Food. Chem.* 59 : 1477-1480.
  - **Vargas, A., J. Pérez, J. P. Zoffoli et A. Pérez. 2001.** Comparación de variables de textura en la medición de firmeza de bayas de uva Thompson seedless. *Cien. Inv. Agr.* 28 : 37-42.
  - **Vicens, A. 2007.** Etude de l'évolution des composés phénoliques et des polysaccharides pariétaux de la pellicule de raisin pendant la maturation – impact sur leur extractibilité en milieu hydroalcoolique. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier, France.
  - **Vicens, A., D. Fournand, P. Williams, L. Sidhoum, M. Moutounet et T. Doco. 2009.** Changes in Polysaccharide and Protein Composition of Cell Walls in Grape Berry Skin (Cv. Shiraz) during Ripening and Over-Ripening. *J. Agric. Food Chem.* 57 : 2955-2960.
  - **Vinsonneau, E. et C. Anneraud. 2008.** Estimation de la maturité : des outils simples de la mise en œuvre. *Matevi* 36 : 1-11.
  - **Wada, H., K.A. Shackel et M.A. Matthews. 2008.** Fruit ripening in *Vitis vinifera*: apoplastic solute accumulation accounts for pre-veraison turgor loss in berries. *Planta* 227 : 1351-1361.
  - **Waldron, K. W., A. C. Smith, A. J. Parr, A. Ng et M. L. Parker. 1997.** New approaches to understanding and controlling cell separation in relation to fruit and vegetable texture. *Trends Food Science Technologies* 8 : 213-221.
  - **Walker, T. L., R.T. threlfall, G. L. Main, O. Lamikanra et S. Leong. 2001.** Density separation, storage, shelf life and sensory evaluation of “fry” muscadine grapes. *HortScience* 36 : 941-945.
  - **Wei, X., S. R. Sykes et P. R. Clingeleffer. 2002.** An investigation to estimate genetic paramètres en CSIRO's table grape breeding program. Quality characteristics. *Euphytica* 128 : 343-351.
  - **Wood, C., T. E. Siebert, M. Parker, D. L. Capone, G. M. Elsey, A. P. Pollnitz. M. J. et Herderich. 2008.** From wine to pepper: rotundone, an obscure sesquiterpene, is a potent spicy aroma compound. *J. Agri. Food. Chem.* 55 : 3738-3744.

- **Yakushii, H., N. Sakurai et K. Morinaga. 2001.** Changes in cell-wall polysaccharides from the mesocarp of grape berries during veraison. *Physiol. Plant.* 111 : 188-195.
- **Yamane T., S.T. Jeong, N. Goto-Yamamoto, Y. Koshita et S. Kobayashi. 2006.** Effect of temperature on anthocyanin biosynthesis in grape berry skins. *Am. J. Enol. Vitic.*, 57 : 54-59.
- **Zouid, I., R. Siret, E. Mehinagic, C. Maury, M. Chevalier et F. Jourjon. 2010.** Evolution of grape berries during ripening: Investigations into the links between their mechanical properties and the extractability of their skin anthocyanins. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 44 : 87-90.
- **Zouid, I. 2011.** Etude de l'évolution de l'extractibilité des composés phénoliques du raisin en milieu hydroalcoolique pendant la maturation-Lien avec les propriétés mécaniques de la baie. Thèse de doctorat, université d'Angers, France.

# Annexes



## Annexes

## Annexe 1

**RECUEIL INTERNATIONAL DES METHODES D'ANALYSES – OIV**  
**Evaluation de la teneur en sucre - réfractométrie**

TABLE II - (suite)

Saccharose % (m/m)	Indice de réfraction à 20 °C	Masse volumique à 20 °C	Sucres en g/l	Sucres en g/kg
15.0	1.35568	1.0598	136.1	128.4
15.1	1.35584	1.0603	137.2	129.4
15.2	1.35600	1.0607	138.3	130.4
15.3	1.35616	1.0611	139.4	131.4
15.4	1.35632	1.0616	140.5	132.4
15.5	1.35648	1.0620	141.6	133.4
15.6	1.35664	1.0624	142.7	134.3
15.7	1.35680	1.0628	143.8	135.3
15.8	1.35696	1.0633	144.9	136.3
15.9	1.35713	1.0637	146.0	137.3
16.0	1.35729	1.0641	147.1	138.3
16.1	1.35745	1.0646	148.2	139.3
16.2	1.35761	1.0650	149.3	140.2
16.3	1.35777	1.0654	150.5	141.2
16.4	1.35793	1.0659	151.6	142.2
16.5	1.35810	1.0663	152.7	143.2
16.6	1.35826	1.0667	153.8	144.2
16.7	1.35842	1.0672	154.9	145.1
16.8	1.35858	1.0676	156.0	146.1
16.9	1.35874	1.0680	157.1	147.1
17.0	1.35891	1.0685	158.2	148.1
17.1	1.35907	1.0689	159.3	149.1
17.2	1.35923	1.0693	160.4	150.0
17.3	1.35940	1.0698	161.6	151.0
17.4	1.35956	1.0702	162.7	152.0
17.5	1.35972	1.0707	163.8	153.0
17.6	1.35989	1.0711	164.9	154.0
17.7	1.36005	1.0715	166.0	154.9
17.8	1.36021	1.0720	167.1	155.9
17.9	1.36038	1.0724	168.3	156.9
18.0	1.36054	1.0729	169.4	157.9
18.1	1.36070	1.0733	170.5	158.9
18.2	1.36087	1.0737	171.6	159.8
18.3	1.36103	1.0742	172.7	160.8
18.4	1.36120	1.0746	173.9	161.8
18.5	1.36136	1.0751	175.0	162.8
18.6	1.36153	1.0755	176.1	163.7
18.7	1.36169	1.0760	177.2	164.7
18.8	1.36185	1.0764	178.4	165.7
18.9	1.36202	1.0768	179.5	166.7
19.0	1.36219	1.0773	180.6	167.6
19.1	1.36235	1.0777	181.7	168.6
19.2	1.36252	1.0782	182.9	169.6
19.3	1.36268	1.0786	184.0	170.6
19.4	1.36285	1.0791	185.1	171.5
19.5	1.36301	1.0795	186.2	172.5
19.6	1.36318	1.0800	187.4	173.5
19.7	1.36334	1.0804	188.5	174.5
19.8	1.36351	1.0809	189.6	175.4
19.9	1.36368	1.0813	190.8	176.4

**RECUEIL INTERNATIONAL DES METHODES D'ANALYSES - OIV**  
**Evaluation de la teneur en sucre - réfractométrie**

TABLE II - (suite)

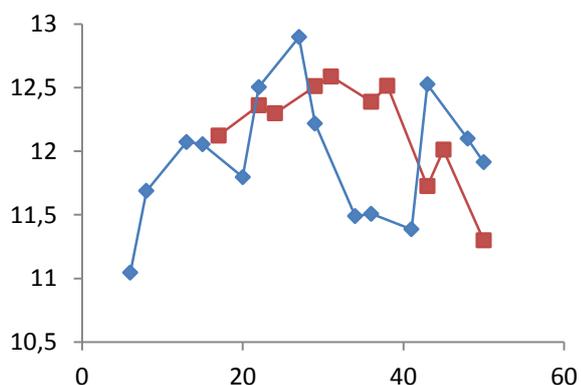
Saccharose % (m/m)	Indice de réfraction à 20 °C	Masse volumique à 20 °C	Sucres en g/l	Sucres en g/kg
20.0	1.36384	1.0818	191.9	177.4
20.1	1.36401	1.0822	193.0	178.4
20.2	1.36418	1.0827	194.2	179.3
20.3	1.36434	1.0831	195.3	180.3
20.4	1.36451	1.0836	196.4	181.3
20.5	1.36468	1.0840	197.6	182.3
20.6	1.36484	1.0845	198.7	183.2
20.7	1.36501	1.0849	199.8	184.2
20.8	1.36518	1.0854	201.0	185.2
20.9	1.36535	1.0858	202.1	186.1
21.0	1.36551	1.0863	203.3	187.1
21.1	1.36568	1.0867	204.4	188.1
21.2	1.36585	1.0872	205.5	189.1
21.3	1.36602	1.0876	206.7	190.0
21.4	1.36619	1.0881	207.8	191.0
21.5	1.36635	1.0885	209.0	192.0
21.6	1.36652	1.0890	210.1	192.9
21.7	1.36669	1.0895	211.3	193.9
21.8	1.36686	1.0899	212.4	194.9
21.9	1.36703	1.0904	213.6	195.9
22.0	1.36720	1.0908	214.7	196.8
22.1	1.36737	1.0913	215.9	197.8
22.2	1.36754	1.0917	217.0	198.8
22.3	1.36771	1.0922	218.2	199.7
22.4	1.36787	1.0927	219.3	200.7
22.5	1.36804	1.0931	220.5	201.7
22.6	1.36821	1.0936	221.6	202.6
22.7	1.36838	1.0940	222.8	203.6
22.8	1.36855	1.0945	223.9	204.6
22.9	1.36872	1.0950	225.1	205.5
23.0	1.36889	1.0954	226.2	206.5
23.1	1.36906	1.0959	227.4	207.5
23.2	1.36924	1.0964	228.5	208.4
23.3	1.36941	1.0968	229.7	209.4
23.4	1.36958	1.0973	230.8	210.4
23.5	1.36975	1.0977	232.0	211.3
23.6	1.36992	1.0982	233.2	212.3
23.7	1.37009	1.0987	234.3	213.3
23.8	1.37026	1.0991	235.5	214.2
23.9	1.37043	1.0996	236.6	215.2
24.0	1.37060	1.1001	237.8	216.2
24.1	1.37078	1.1005	239.0	217.1
24.2	1.37095	1.1010	240.1	218.1
24.3	1.37112	1.1015	241.3	219.1
24.4	1.37129	1.1019	242.5	220.0
24.5	1.37146	1.1024	243.6	221.0
24.6	1.37164	1.1029	244.8	222.0
24.7	1.37181	1.1033	246.0	222.9
24.8	1.37198	1.1038	247.1	223.9
24.9	1.37216	1.1043	248.3	224.8

OIV-MA-AS2-02 : R2009

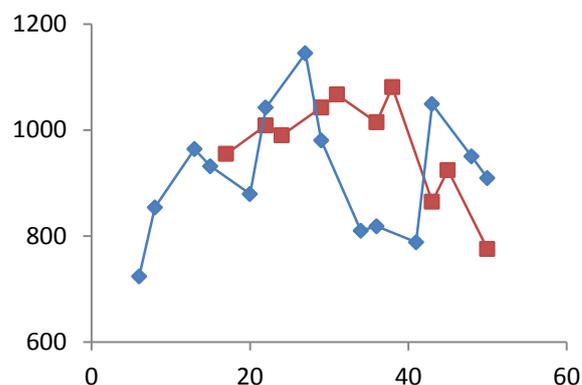
6

**Annexe 2 : Comparaison de l'évolution des paramètres physiques au cours de la maturation entre les millésimes 2011 (trait rouge ; marqueur carré) et 2012 (trait bleu ; marqueur losange).**

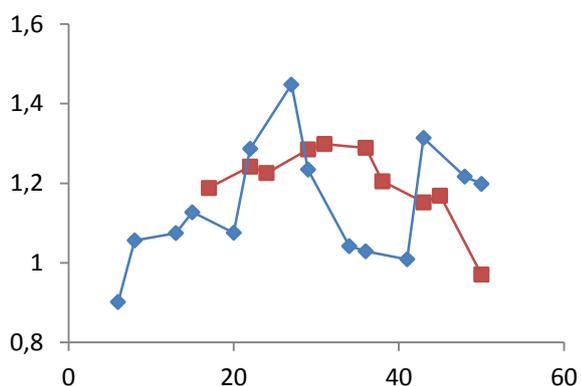
### Hauteur (mm)



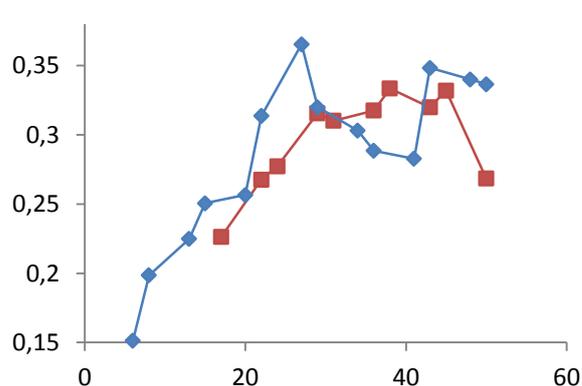
### Volume (mm<sup>3</sup>)



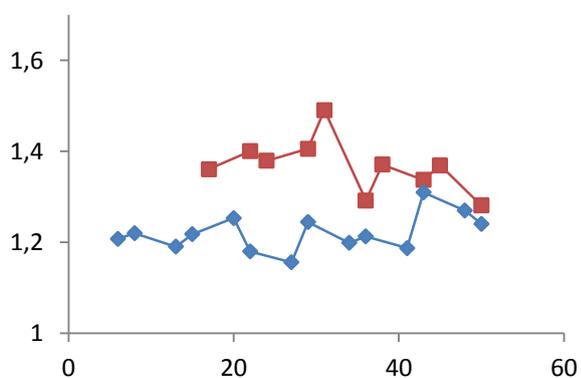
### Poids frais (g)



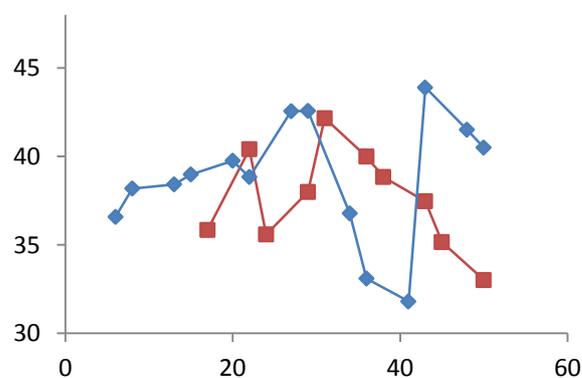
### Poids sec (g)



### Nombre de pépins

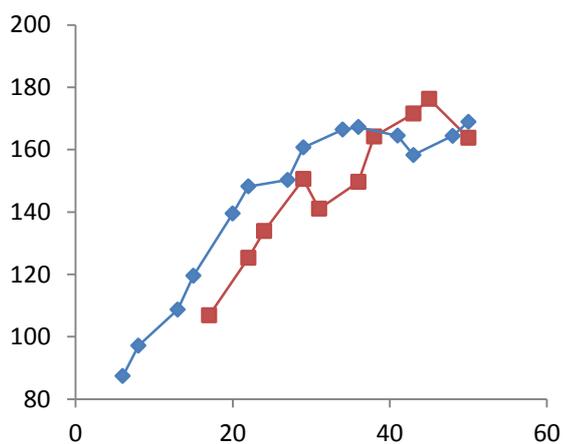


### Poids pépins (mg)

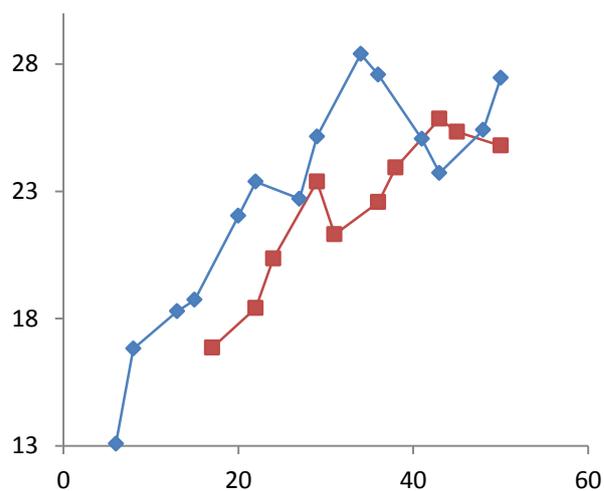


**Annexe 3** : Comparaison de l'évolution des paramètres physiologiques au cours de la maturation entre les millésimes 2011 (trait rouge ; marqueur carré) et 2012 (trait bleu ; marqueur losange).

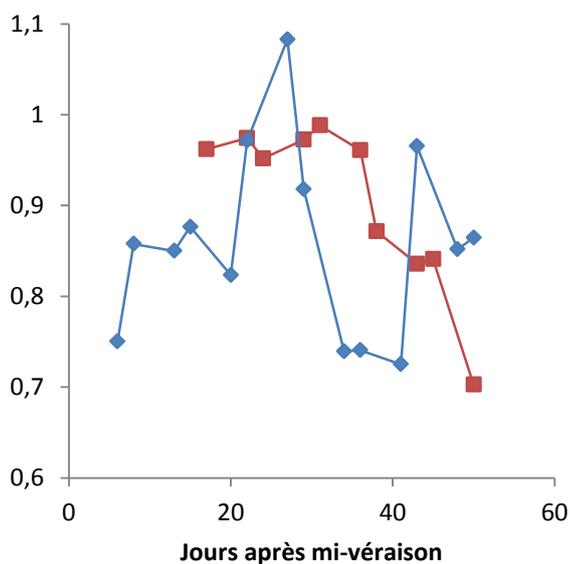
**Densité (g/L equiv NaCl)**



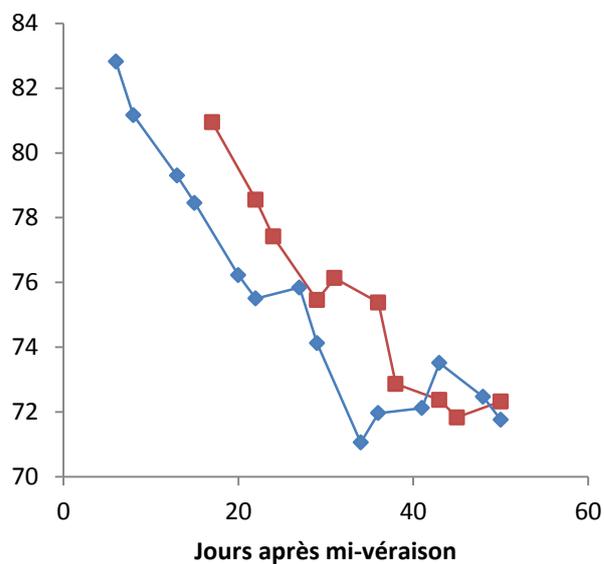
**°Brix**



**Volume eau (mL)**



**%eau (% poids frais)**



## Annexe 4 : Données climatiques au cours des millésimes 2011 et 2012

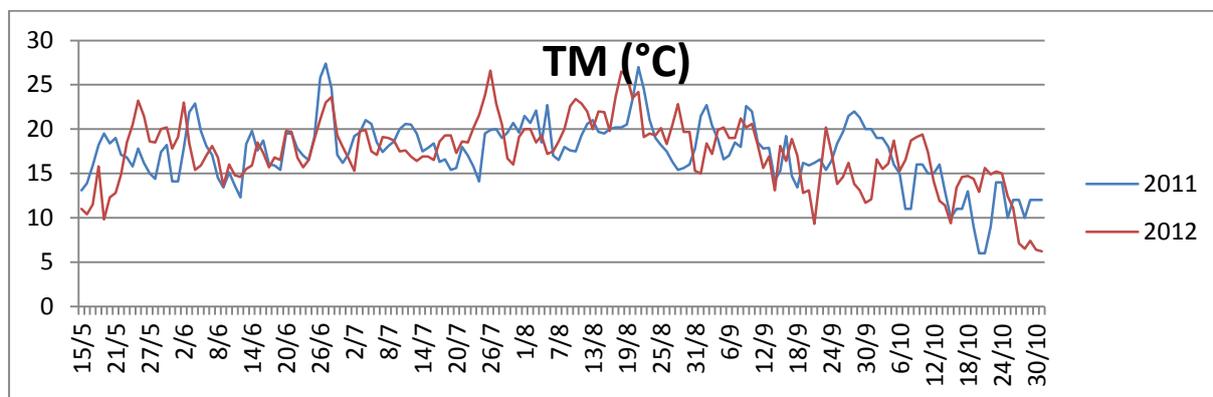


Figure 55. Evolution de la température moyenne (°C) au cours des millésimes 2011 et 2012 pour la station météorologique de Montreuil-Bellay.

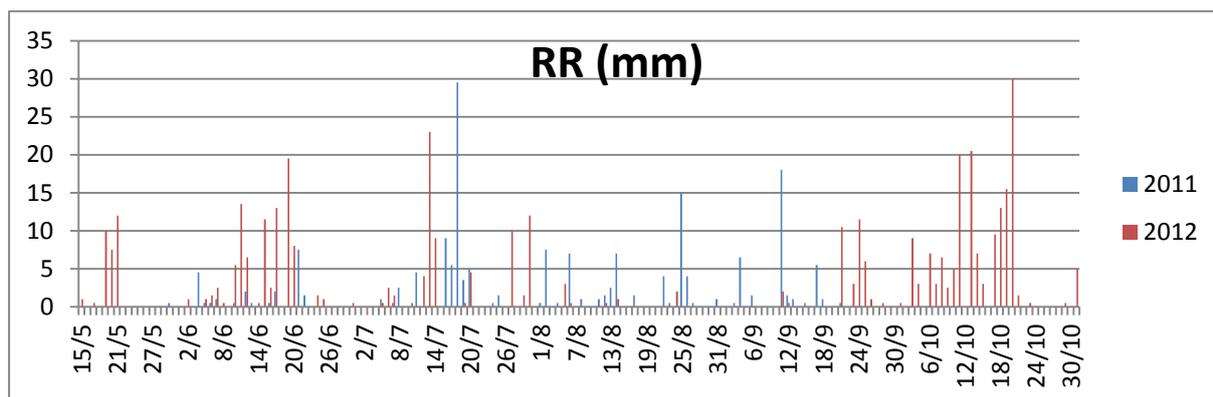


Figure 56. Evolution de précipitations (mm) au cours des millésimes 2011 et 2012 pour la station météorologique de Montreuil-Bellay.

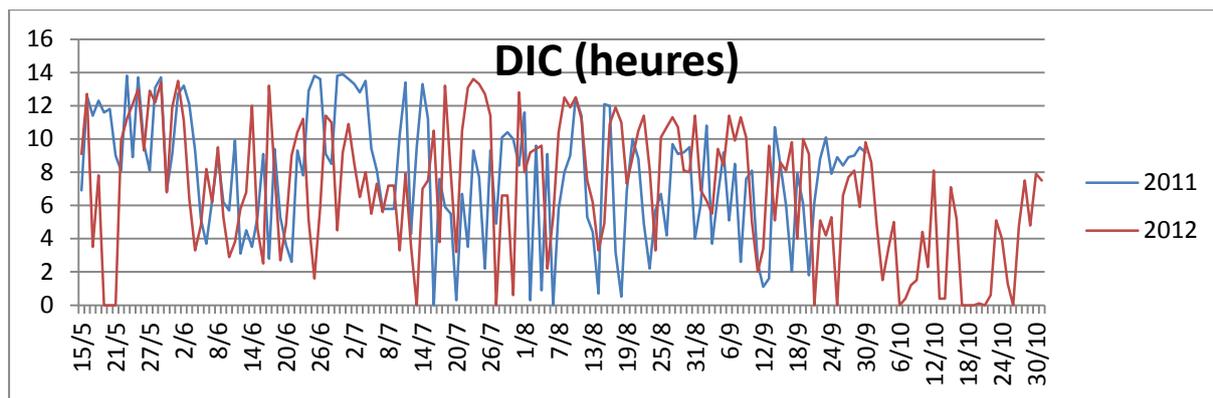


Figure 57. Evolution de la durée d'insolation (heures) au cours des millésimes 2011 et 2012 pour la station météorologique de Montreuil-Bellay.

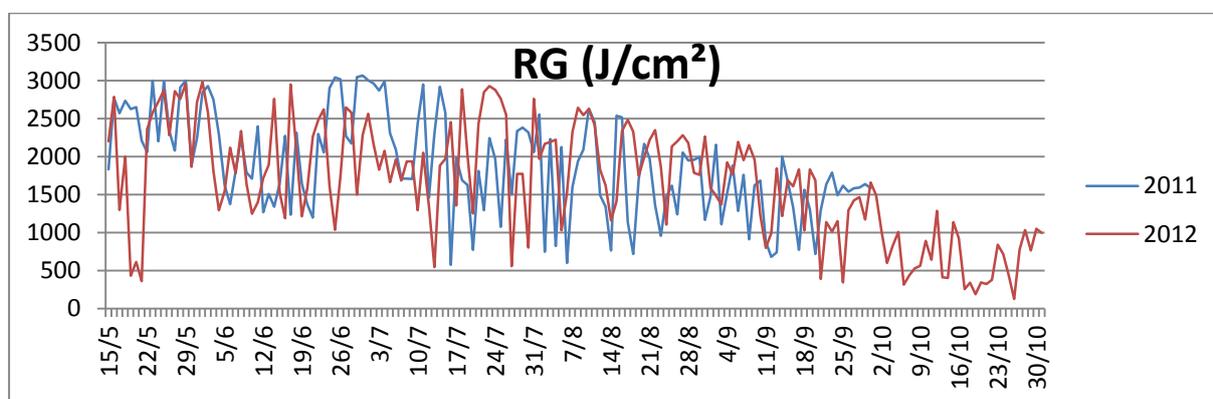


Figure 58. Evolution du rayonnement global (J/cm<sup>2</sup>) au cours des millésimes 2011 et 2012 pour la station météorologique de Montreuil-Bellay.

## Annexe 5 Publications et posters

### Viticulture

2601 MISE 125-V512

## Evolution des propriétés mécaniques des raisins de Cabernet franc et de Chenin (*Vitis vinifera* L.) au cours de la maturation

Stéphanie DOUMOUYA<sup>1</sup>, Marc LAHAYE<sup>2</sup>, Ronan SYMONEAUX<sup>1</sup>, René SIRET<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unité de recherche GRAPPE, UMT VINITERA, Ecole supérieure d'agriculture d'Angers, France

<sup>2</sup>Unité BIA, INRA Nantes, France

Renseignements: Stéphanie Doumouya, e-mail: s.doumouya@groupe-esa.com, www.groupe-esa.com

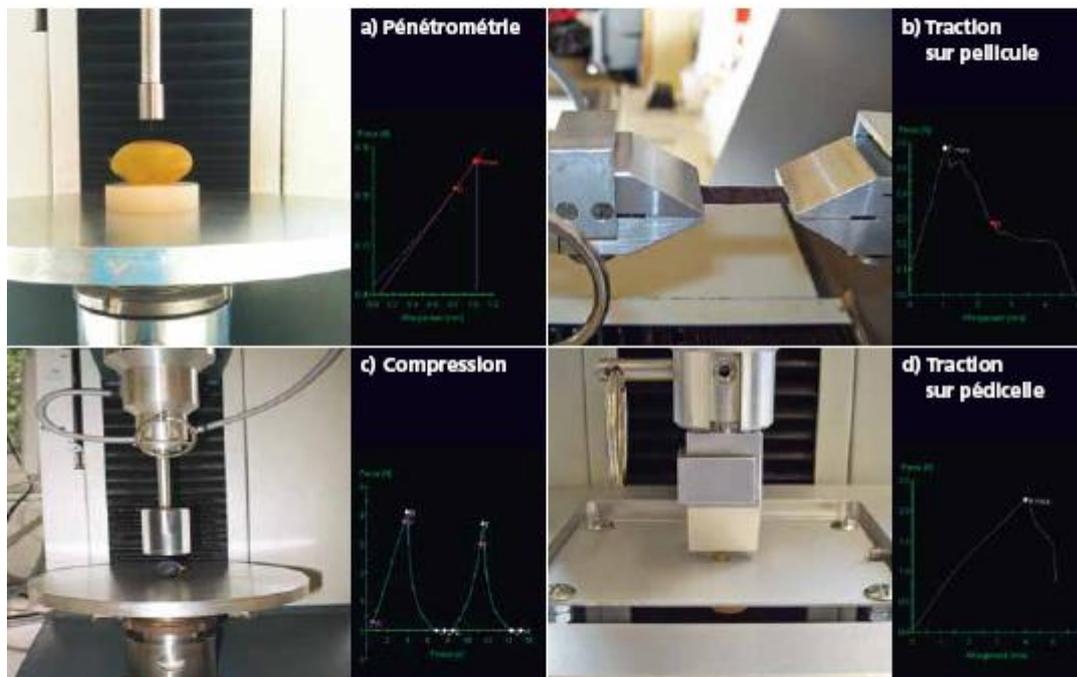


Figure 1 | Les différentes techniques de mesure instrumentales de la texture utilisées et le type de courbes associées.

### Introduction

La qualité du vin est une préoccupation majeure de la filière viti-vinicole, abordée dès le vignoble par la détermination de la qualité du raisin. Deux facteurs principaux déterminent les choix de vinification: le niveau de maturité des baies de raisin et le type de terroir. Pour le contrôle de la maturité, deux types d'indicateurs sont classiquement utilisés: les indicateurs liés aux sucres, à l'acidité et au pH qui traduisent la matu-

rité technologique et les indicateurs sur la teneur en composés phénoliques permettant d'estimer la maturité phénolique. Cependant, les professionnels de la filière ont réalisé que ces indicateurs n'appréhendent que partiellement la qualité du raisin. L'hypothèse d'un lien entre la variation de l'extractibilité des composés phénoliques et les propriétés mécaniques de la baie, englobées sous le terme général de «texture», peut être avancée. En effet, divers travaux (Le Moigne et al. 2008; Maury et al. 2009; Zouid et al. 2010) ont démon-

tré l'intérêt d'appréhender la qualité texturale du raisin par l'étude de la variation des propriétés mécaniques des baies de Cabernet franc au cours de leur maturation. Cependant, peu de données ou de travaux sont référencés dans la littérature sur l'analyse de ces propriétés et leur évolution pour des variétés de raisins blancs. Le présent travail se propose, à travers l'étude de l'évolution de la texture des raisins à différents stades de maturation, d'analyser et de comparer les propriétés mécaniques de deux variétés de raisins de cuve du Val de Loire (France), de couleur et d'origine différentes, le Cabernet franc et le Chenin. Pour cela, cinq méthodes instrumentales ont été utilisées: la double compression 20 %, la simple compression 70 %, la pénétrométrie, la traction sur pellicule et la traction sur pédicelle.

## Matériel et méthodes

### Prélèvements et échantillonnages

Dans le cadre de cette étude, l'évolution des propriétés mécaniques des baies de Chenin et de Cabernet franc issues de six parcelles différentes du Val de Loire en France (tabl.1) a été étudiée pour le millésime 2010, sur trois dates en fin de maturation de fin septembre à mi-octobre. Pour chaque parcelle, les baies ont été récoltées hebdomadairement avec leur pédicelle selon le protocole IFV (Vinsonneau et Anneraud 2008). Cette méthode consiste à collecter des échantillons sur des ceps situés au milieu des rangs. Chaque fraction contient trois à cinq baies alternativement prélevées sur le haut ou le bas de la grappe jusqu'à ce que 450 baies soient collectées. Les raisins ainsi prélevés ont été stockés dans des boîtes individuelles et réfrigérés afin de limiter la trituration des baies lors du transport au laboratoire GRAPPE (ESA, Angers, France). Pour chaque date, un tirage aléatoire est réalisé afin de les répartir en cinq lots homogènes de trente baies. Chacun des lots est destiné aux mesures de propriétés mécaniques par une des cinq techniques. Une modalité correspond à un prélèvement d'une parcelle à un stade de maturité.

**Tableau 1** | Codification et localisation des parcelles du dispositif expérimental

Variété	Numéro de parcelle	Localisation
Cabernet franc	F2	Bourguil
	F3	Saint-Nicolas-de-Bourguil
Chenin	F10	Chalonnas-sur-Loire
	F11	Chalonnas-sur-Loire
	F19	Vaudrétien
	F36	Vaudrétien

### Résumé

En étudiant l'évolution de la texture des raisins à différents stades de maturation, ce travail analyse et compare les propriétés mécaniques de deux variétés de raisin de cuve du Val de Loire (France), de couleur et d'origine différentes (Cabernet franc et Chenin). Pour cela, cinq méthodes instrumentales ont été utilisées: la double compression 20 %, la simple compression 70 %, la pénétrométrie, la traction sur pellicule et la traction sur pédicelle. Globalement, les différentes techniques de mesure de la texture indiquent des différences entre les stades de maturité, les parcelles et les variétés. Il existe des différences entre ces techniques et chacune fournit des informations spécifiques. Les techniques de mesure sur baie entière (compression 20 % et compression 70 %) semblent plus efficaces sur des variétés de Chenin. A l'inverse, les mesures instrumentales de texture relatives à la pellicule (pénétrométrie et traction sur pellicule) possèdent au moins un paramètre capable de différencier des dates de maturation chez le Cabernet franc. D'après l'ensemble des résultats, le paramètre F-max s'avère un bon critère de comparaison entre les deux cépages. Cette étude a ainsi permis de démontrer que les propriétés mécaniques des deux variétés blanche et rouge de raisin de cuve étudiées étaient significativement différentes. Les pellicules des baies de Cabernet franc sont en effet plus résistantes que celles du Chenin. Il devrait être intéressant, par la suite, de mieux comprendre l'origine de ces évolutions et de poursuivre en identifiant à l'échelle microscopique et biochimique (cellules et parois du raisin) les paramètres responsables de la variation des propriétés mécaniques pendant la maturation.

### Analyses des propriétés mécaniques

Les tests ont été réalisés à l'aide d'un texturomètre universel: TAxT2i Texture Analyzer (Stable Micro Systems-SMS, Surrey, 119 UK).

### Mesures mécaniques sur la pellicule de raisin

Pénétrométrie (fig.1a): une aiguille P2/N perce la baie placée en position équatoriale à une profondeur de 3mm et à une vitesse de 8 mm/s. Une courbe force/allongement est analysée et trois paramètres en découlent: la force (Fmax) en N pour pénétrer la pellicule, l'énergie à la rupture (W) en mJ, la pente associée à la force maximale (Grad) en N/mm, et l'allongement à la rupture (ALmax) en mm.

**Traction sur pellicule (fig.1b):** des échantillons de pellicules de surface identique subissent une traction jusqu'à leur déchirure. Les paramètres qui en découlent sont la force (Fmax) en N, l'allongement maximal (ALmax) en mm et l'énergie (W) en mJ.

#### Mesures mécaniques de la baie entière

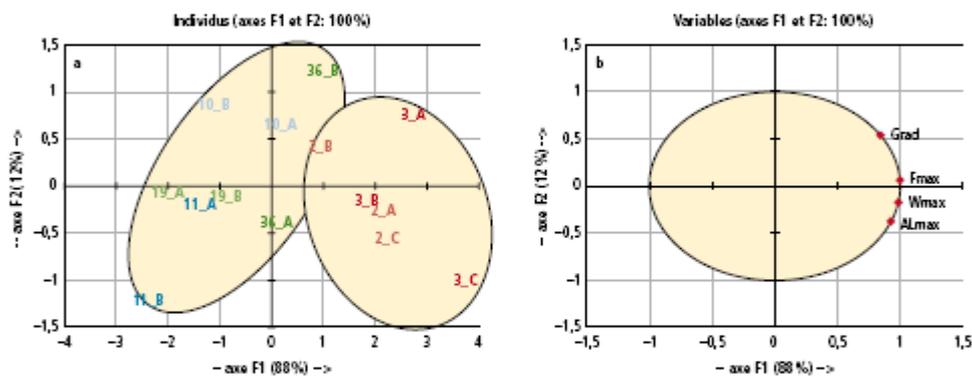
Afin de s'affranchir de la forme de la baie, les valeurs obtenues sont normalisées en divisant par la hauteur de la baie.

**Double compression 20 % (fig.1c):** la baie placée en position équatoriale subit deux compressions successives à une vitesse constante de 50mm/min et un taux de compression à 20% de sa hauteur. La courbe force/temps qui en découle donne les paramètres suivants: force maximale à la première compression (F1) et à la

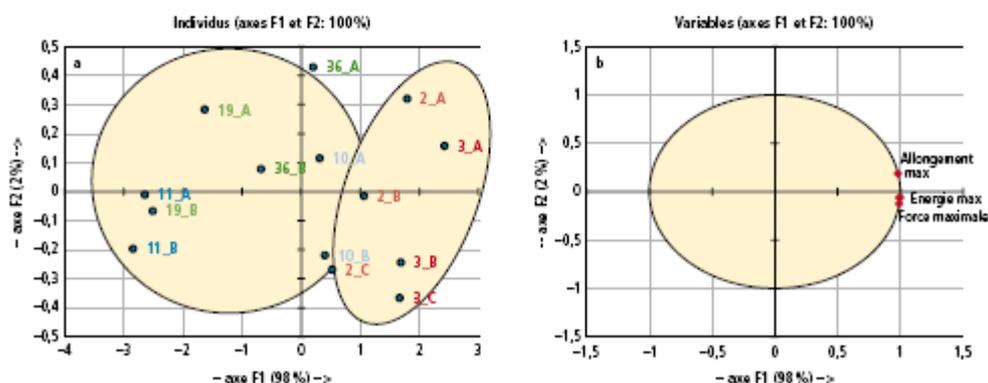
deuxième compression (F2) mesurée en N; l'énergie liée au premier cycle et au deuxième cycle de compression, respectivement (W1) et (W2), mesurée en mJ; la pente au départ, à la première et à la deuxième compression, respectivement (Grad0), (Grad1) et (Grad2) mesurée en N/mm et deux paramètres secondaires qui sont la cohésion (rapport entre W1 et W2) et le caractère gommeux (produit de F1 et la cohésion).

**Compression simple 70 % (fig.1c):** la baie placée en position équatoriale subit une compression destructive à 70 % de sa hauteur à une vitesse constante de 80mm/min. Les paramètres qui en découlent sont la force (Fmax) en N et l'énergie (W) en mJ.

**Traction sur pédicelle (fig.1d):** les paramètres qui en découlent sont la force (Fmax) en N, l'allongement maximal (ALmax) en mm et l'énergie (W) en mJ.



**Figure 2** | Analyse en composantes principales des paramètres de pénétration. Les individus sont identifiés selon le codage suivant: «numéro de parcelle\_date». a: individus, b: variables.



**Figure 3** | Analyse en composantes principales des paramètres de traction sur pellicule. Les individus sont identifiés selon le codage suivant: «numéro de parcelle\_date». a: individus, b: variables.

### Analyses statistiques

Pour mettre en évidence les effets liés à la maturation et à la parcelle en fonction des paramètres de propriétés mécaniques des raisins, des analyses de variance à deux facteurs sont effectuées sur l'ensemble des données selon le modèle suivant: paramètre = date + parcelle + date\*parcelle.

Le tableau 2 présente les valeurs des probabilités associées pour les paramètres issus des cinq types de mesures physiques. Une analyse en composante principale a également été réalisée pour chacune des mesures instrumentales de texture.

### Résultats et discussion

#### Comparaison des textures par pénétrométrie

D'après le tableau 2, les résultats de l'ANOVA montrent que la technique de pénétrométrie est capable de discriminer significativement les deux variétés Cabernet franc et Chenin entre elles. Les effets de la date et de la

parcelle sont significatifs au seuil de 5% pour tous les paramètres de pénétrométrie pour la variété Cabernet franc. En revanche pour la variété Chenin, l'effet de la date n'est pas significatif: quelle que soit la maturité il n'y a pas de différence de texture. La figure 2a montre l'analyse en composantes principales pour la pénétrométrie. La composante principale 1 (PC1) explique 88% de la variabilité dans les échantillons et la composante principale 2 (PC2), 12%. Sur la première composante, on observe une répartition des échantillons selon leur variété: Cabernet franc à droite du plan factoriel et Chenin à gauche. L'analyse des poids factoriels (fig.2b) indique que les variables expliquant la plus grande part de la variance de la composante PC1 sont «F-max», «W» et «ALmax». Les résultats de l'ACP et de l'ANOVA confirment que la technique de pénétrométrie permet de différencier significativement des baies de variétés différentes. Cette technique permet aussi de discriminer des degrés de maturité différents au sein d'une même variété, notamment par le paramètre F-max. »

**Tableau 2 |** Analyse de variance (ANOVA) pour les paramètres texturaux en fonction de la maturité et de l'origine des cépages Cabernet Franc et Chenin

	Paramètres	Cabernet franc			Chenin			Effet variété
		Date P	Parcelle P	Date*parcelle P	Date P	Parcelle P	Date*parcelle P	
Pénétrométrie	Fmax	< 0,001	<0,001	ns	ns	<0,001	< 0,001	< 0,001
	ALmax	<0,001	<0,05	< 0,05	ns	<0,01	< 0,01	< 0,001
	W	<0,001	<0,001	ns	ns	<0,001	< 0,01	< 0,001
	Grad	<0,05	<0,05	ns	ns	<0,001	< 0,001	< 0,001
Traction pellicule	Fmax	ns	<0,05	ns	ns	<0,001	ns	< 0,001
	ALmax	<0,001	ns	ns	ns	<0,001	ns	< 0,001
	W	ns	<0,01	ns	ns	<0,001	ns	< 0,001
Double compression 20%	F1	<0,001	ns	ns	<0,001	<0,001	< 0,05	< 0,01
	F2	<0,001	ns	ns	<0,001	<0,001	< 0,05	< 0,01
	Grad0	<0,01	ns	ns	<0,001	<0,05	< 0,001	ns
	Grad1	ns	ns	ns	<0,001	<0,01	< 0,05	<0,05
	Grad2	ns	<0,05	ns	<0,001	<0,001	< 0,05	< 0,001
	W1	<0,05	ns	ns	ns	<0,001	< 0,001	ns
	W2	<0,001	<0,05	ns	ns	<0,001	< 0,01	< 0,05
	Cohésion	<0,05	<0,05	ns	<0,001	<0,001	< 0,001	< 0,001
Gommeux	<0,001	<0,01	ns	<0,001	<0,001	ns	< 0,001	
Compression 70%	Fmax	ns	ns	< 0,01	<0,001	<0,01	< 0,001	<0,01
	W	ns	<0,001	ns	<0,001	<0,001	< 0,001	<0,05
Traction pédicelle	Fmax	ns	ns	< 0,05	ns	<0,001	ns	ns
	ALmax	<0,05	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	W	<0,05	ns	ns	ns	<0,001	ns	ns

Significativité avec probabilité p = < 0,001
Significativité avec probabilité p = < 0,01
Significativité avec probabilité p = < 0,05  
 ns = non significatif

Des études ont montré que la force à la rupture de la pellicule est le paramètre mécanique le plus fiable pour estimer l'extractibilité des anthocyanes (Rolle et al. 2008; 2009; Zouid et al. 2010).

#### Comparaison des textures par traction sur pellicule

Le tableau 2 montre que tous les paramètres de traction sur pellicule permettent de discriminer significativement les variétés de Chenin et Cabernet franc. La date n'a pas d'effet significatif pour la variété Chenin alors que, pour le Cabernet franc, l'Allongement max montre des différences significatives en fonction de la date au seuil de 5%. L'analyse en composantes principales (fig. 3) montre une répartition des échantillons en fonction de la parcelle et de la variété sur l'axe 1 de la composante expliquant 98% de la variance observée.

#### Comparaison des textures par double compression 20%

La double compression 20% est celle qui fournit le plus de paramètres parmi les cinq techniques testées. L'analyse de variance de ces paramètres (tabl. 2) montre que cette technique est globalement plus efficace avec le cépage Chenin que pour le Cabernet franc. Pour le Chenin, la quasi-totalité des paramètres permet de différencier significativement la date et la parcelle d'origine. L'interaction date x parcelle est aussi significative au seuil de 5% pour tous les paramètres, laissant supposer que chaque parcelle possède sa propre cinétique de maturation, s'exprimant par les propriétés mécaniques liées au ramollissement des baies, et que l'effet de la date et celui de la parcelle ne peuvent pas être considérés indépendamment. Les résultats de l'ACP (fig. 4a et b) confirment ceux de l'ANOVA, avec une répartition en fonction de la parcelle sur l'axe de la composante 1. L'axe 2 quand à lui sépare les échantillons en fonction de la variété et de la date pour le Chenin. Le Moigne et al. (2008), Zouid et al. (2010) ont également montré que la technique de double compression est efficace pour discriminer des millésimes, des parcelles et des dates de maturation. Abbal et al. (1992) ont caractérisé la date de véraison par des méthodes de compression 30% et aussi différencié cinq cépages rouges en utilisant la compression 20%. La baisse de la valeur F-max reflète le ramollissement de la baie de raisin au cours de la maturation, conséquence de changements physiologiques et structuraux importants. La littérature rapporte que la baisse de fermeté des fruits coïncide avec la dissolution de la lamelle moyenne, entraînant une réduction de la cohésion des cellules, la dépolymérisation et la solubilisation des hémicelluloses et des polysaccharides pectiques des parois cellulaires, et parfois un épaissement de la paroi (Brummel et Harpster 2001). De plus Thomas et al.

(2008) et Wada et al. (2009) ont observé des corrélations entre la pression de turgescence et la fermeté des fruits, suggérant que le ramollissement de la baie de raisin serait dû à la perte de la pression de turgescence à la maturation, laquelle pourrait être attribuée à l'apparition de solutés dans l'apoplaste des baies.

#### Comparaison des textures par compression destructive 70%

L'ANOVA (tabl. 2) révèle que la technique de compression 70% est très efficace pour différencier significativement la date et la parcelle chez le Chenin, pour lequel l'interaction date x parcelle également est significative au seuil de 5% pour tous les paramètres de compression 70% étudiés. L'ACP (fig. 5a) confirme que la méthode permet de distinguer des parcelles différentes. On observe un effet maturité sur l'axe de la composante 2. L'analyse des poids factoriels (fig. 5b) indique que la variable expliquant la plus grande part de la variance de la composante PC1 est «F-max».

#### Comparaison des textures par traction sur pédicelle

La technique de traction sur pédicelle vise à recréer en laboratoire une technique empirique utilisée par les viticulteurs pour évaluer la maturité à la parcelle, pour qui l'un des critères est la facilité à décrocher le pédicelle de la baie de raisin. Le Moigne et al. (2008) ont montré en outre que ce critère était pertinent dans l'évaluation de la qualité des baies par analyse sensorielle. Les résultats de l'ANOVA (tabl. 2) montrent que la technique de traction sur pédicelle ne permet pas de différencier les deux variétés de raisin blanc et rouge. L'effet de la date est significatif pour les paramètres «ALmax» et «Energie max» chez le Cabernet. En revanche, les paramètres «F-max» et «Energie max» permettent de différencier significativement des parcelles d'origine différente pour le Chenin. Les résultats de l'ACP (fig. 6) montrent que le facteur influençant le plus la variabilité observée entre les échantillons est «Energie max».

La comparaison des techniques instrumentales de mesure de la texture montre que l'on peut discriminer des stades de maturité, des parcelles et des variétés entre elles. Les techniques de mesure sur baie entière telles que les compressions 20% et 70% semblent plus efficaces sur des variétés de Chenin. A l'inverse, les mesures de texture liées à la pellicule telles que la pénétrométrie et la traction sur pellicule possèdent au moins un paramètre capable de différencier des dates de maturation chez la variété Cabernet franc. D'après l'ensemble des résultats, le paramètre «F-max» s'avère un bon critère de comparaison entre les deux cépages. »

Tableau 3 | Comparaison du paramètre Fmax entre les variétés de Cabernet Franc et Chenin

		Pénétrométrie	Traction pellicule	Double compression 20 %	Compression 70 %	Traction pédoncule
Valeur moyenne Fmax (N)	Cabernet Franc	0,0338 ± 0,005	1,95 ± 0,05	2,59 ± 0,05	7,84 ± 0,18	1,49 ± 0,04
	Chenin	0,228 ± 0,005	1,18 ± 0,04	2,38 ± 0,04	5,96 ± 0,15	1,46 ± 0,04
	Significativité	***	***	*	***	ns

Significativité p < 0,05 (\*); p < 0,001 (\*\*); ns: non significatif.

Le tableau 3 donne les valeurs moyennes «F-max» obtenues en réunissant l'ensemble des parcelles et les dates de prélèvement d'une même variété. La comparaison des résultats montre des différences significatives en termes de propriétés mécaniques entre les deux variétés testées. Pour la traction sur pellicule, les valeurs de «F-max» atteignent 1,95 et 1,18N respectivement pour le Cabernet franc et le Chenin avec une significativité de p < 0,001. Pour la pénétrométrie, ces valeurs de «F-max» de 0,338 et 0,228 N distinguent significativement (p < 0,001) le Cabernet franc du Chenin. Les valeurs «F-max» extraites des mesures de pénétrométrie et de traction de la pellicule indiquent que les pellicules des raisins de Cabernet franc sont plus résistantes que celles du Chenin.

## Conclusions

- D'après la littérature et les résultats obtenus lors de cette étude, les méthodes d'analyse des propriétés mécaniques sont pertinentes pour étudier l'origine, la variété et le degré de maturité.

- Parmi les mesures physiques utilisées, les techniques de double compression 20 % et de pénétrométrie semblent les plus efficaces pour différencier la date de prélèvement et la parcelle d'origine.
- Les méthodes de traction sur pédoncule et de compression 20 % nécessiteraient d'être mieux optimisées.
- L'étude a pu démontrer que les propriétés mécaniques des variétés blanche et rouge étaient significativement différentes. Les pellicules de Cabernet franc sont plus résistantes que les pellicules de Chenin.
- Les différences de résultats entre les variétés testées rouge et blanche peuvent refléter la sensibilité plus importante des raisins de cépages blancs aux attaques fongiques.
- Il serait intéressant par la suite de mieux comprendre l'origine de ces évolutions et d'identifier à l'échelle microscopique (cellules et parois du raisin) les phénomènes responsables de la variation des propriétés mécaniques du raisin durant sa maturation. ■

## Bibliographie

- Abbal P., Boullet J. C. & Moutounet M., 1992. Utilisation de paramètres pour caractériser la véraison des baies de raisin. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 26, 231-237.
- Brummel D. & Harpster M., 2001. Cell wall metabolism in fruit softening and quality and its manipulation in transgenic plants. *Plant molecular Biology* 47, 311-340.
- La Moigne M., Symoneaux R. & Jourjon F., 2008. Sensory and instrumental characterisation of Cabernet franc grapes according to ripening stages and growing location. *Food Quality and Preference* 19, 220-231.
- La Moigne M., 2008. Recherche de mesures innovantes pour suivre la qualité du raisin de Cabernet franc pendant sa maturation. Thèse de doctorat, Université d'Angers, France. 254 p.
- Maury C., Madeta E., La Moigne M., Mahinagic E., Siret R. & Jourjon F., 2009. Development of a mechanical texture test to evaluate the ripening process of Cabernet franc. *Journal of Texture Studies* 40, 511-535.
- Rolle L., Torchio F., Zappa G. & Gerbi V., 2008. Anthocyanin extractability assessment of grape skins by texture analysis. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 42, 157-162.
- Rolle L., Torchio F., Zappa G. & Gerbi V., 2009. Relationship between skin break force and anthocyanin extractability at different ripening stages. *American Journal of Enology and Viticulture* 60, 93-97.
- Rolle L., Siret R., Rio Sagado S., Maury C., Gerbi V. & Jourjon F., 2012. Instrumental Texture Analysis Parameters as Markers of Table-Grape and Winegrape Quality: A Review. *American Journal of Enology and Viticulture* vol???, pages???
- Thomas T., Shackal K. & Matthews M., 2008. Mesocarp cell turgor in *Vitis vinifera* L. berries throughout development and its relation to firmness, growth, and the onset of ripening. *Planta* 228, 1067-1076.
- Vinconneau E. & Anneraud C., 2008. Estimation de la maturité: des outils simples de mise en œuvre. *Mataxi* 36, 1-11.
- Wada H. et al., 2009. Fruit ripening in *Vitis vinifera*: apoplastic solute accumulation accounts for pre-veraison turgor loss in berries. *Planta* 227, 1351-1361.
- Zouid I., Siret R., Mahinagic E., Maury C., Chevalier M. & Jourjon F., 2010. Evolution of grape berries during ripening: investigations into the links between their mechanical properties and extractability of their skin anthocyanins. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 44, 87-99.

**Summary** ■ Study and comparison of changes in mechanical properties of grapes from the Cabernet franc and Chenin (*Vitis vinifera* L.) during maturation

A comparative analysis of the mechanical properties was conducted on two wine grapes varieties from the Loire Valley (France) differing in color and origin (Chenin and Cabernet franc). The evolution of the texture of the grapes was observed at different stages of maturation with five instrumental methods: double compression 20 %, simple compression 70 %, penetrometry, skin traction and pedicel traction. Overall, the comparison showed that different stages of maturity could be distinguished as well as the varieties and vineyards. Techniques applied to whole-berry features such as compression 20 % and compression 70 % were more effective on the Chenin varieties. On the other hand, skin texture measurement techniques such as penetrometry and skin traction offered at least one parameter that could differentiate dates of maturation in cv. Cabernet franc. Considering all the data, the F-max parameter appeared to be a useful criterion for comparing the two varieties. This study demonstrated that mechanical properties of red and white grapes are significantly different: berry skins of Cabernet franc were more resistant than those of Chenin. To better understand these mechanical differences, an investigation at microscopic and biochemical scale will be undertaken in the near future.

**Key words:** Grape, mechanical properties, Cabernet franc, Chenin.

■ Vergleich von Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der Trauben der Cabernet franc und Chenin (*Vitis vinifera* L.) während der Reifung

Diese Studie präsentiert eine vergleichende Analyse der mechanischen Eigenschaften von zwei aus dem Tal von Loire (Frankreich) stammenden Weintraubensorten verschiedener Herkunft und Farbe (Chenin und Cabernet franc). Diese Analyse wurde unter Berücksichtigung der Textur der Beeren in verschiedenen Reifungsstadien mit fünf instrumentellen Untersuchungsmethoden durchgeführt: 20 % zweifache Kompression, 70 % einfache Kompression, Penetrometrie, Zugfestigkeit des Stiels und der Schale. Im Allgemeinen zeigen die verschiedenen Techniken, dass unterschiedliche Reifungsstadien für verschiedene Weinbergen und Sorten erkannt werden können. Messtechniken, die die gesamte Beere betrachten, wie 20 % und 70 % Kompression, sind anscheinend genauer für die Rebsorte Chenin. Andererseits können für die Sorte Cabernet franc die Techniken zur Messung der Konsistenz der Schale (Penetrometrie oder Zugfestigkeit) die Reifenzeiten unterscheiden. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Parameter F-max gut angemessen für einen Vergleich beider Rebsorten. Diese Studie hat gezeigt, dass die mechanischen Eigenschaften der roten und weissen Trauben sehr unterschiedlich sind: die Schalen der Cabernet-Trauben sind widerstandsfähiger als Chenin. Um die Ursachen dieser Unterschiede zu verstehen, wird in der nahen Zukunft eine neue Untersuchung auf mikroskopischer und biochemischer Stufe weiter durchgeführt.

■ Riassunto

Evoluzione delle variazioni di proprietà meccaniche di uva dal Cabernet franc e Chenin (*Vitis vinifera* L.) durante la maturazione

In questo studio si presenta un'analisi comparativa delle proprietà meccaniche di due cultivar della Valle della Loira (Francia), differenti per colore e origine (Chenin e Cabernet). Questa analisi è stata fatta considerando l'evoluzione della consistenza degli acini a differenti stadi di maturazione. Sono stati utilizzati cinque metodi di indagine strumentale: compressione doppia al 20 %, compressione semplice al 70 %, penetrometria, trazione della buccia e trazione del pedicello. In generale il paragone mostra che si possono distinguere diversi stadi di maturazione così come le diverse cultivar e i differenti vigneti. Tecniche di misurazione che considerano caratteristiche globali dell'acino come la compressione al 20 % o al 70 % funzionano meglio sulla varietà Chenin. D'altro canto le tecniche di misurazione della consistenza della buccia (penetrometria o trazione della buccia) permettono di distinguere diversi stadi di maturazione nel caso del Cabernet franc. Considerando tutti i dati, il parametro F-max risulta di essere molto utile per paragonare le due cultivar. Questo studio dimostra che le proprietà meccaniche delle uve rosse e bianche sono molto diverse: le bucce delle uve Cabernet sono più resistenti di quelle del Chenin. Per capire le ragioni di tali differenze, continueremo le nostre indagini su una scala microscopica e biochimica nel prossimo futuro.

**American Journal of Enology and Viticulture**  
**Physical and Physiological Heterogeneity Within Grape the Bunch: Impact on**  
**Mechanical Properties During Maturation**  
 --Manuscript Draft--

<b>Manuscript Number:</b>	AJEV-D-13-00062R3
<b>Full Title:</b>	Physical and Physiological Heterogeneity Within Grape the Bunch: Impact on Mechanical Properties During Maturation
<b>Article Type:</b>	Research Article
<b>Keywords:</b>	Grape bunch, mechanical properties, heterogeneity, physiology, maturation
<b>Corresponding Author:</b>	Stéphanie Doumouya Groupe ESA Angers, Maine-et-Loire FRANCE
<b>Corresponding Author Secondary Information:</b>	
<b>Corresponding Author's Institution:</b>	Groupe ESA
<b>Corresponding Author's Secondary Institution:</b>	
<b>First Author:</b>	Stéphanie Doumouya
<b>First Author Secondary Information:</b>	
<b>Order of Authors:</b>	Stéphanie Doumouya Marc Lahaye Chantal Maury René SIRET
<b>Order of Authors Secondary Information:</b>	
<b>Manuscript Region of Origin:</b>	FRANCE
<b>Abstract:</b>	<p>Mechanical properties are emerging as a complementary criterion to evaluate grape berry quality for wine making. As texture is evaluated on a berry per berry basis it is important to assess the impact of the within grape heterogeneity on mechanical properties.</p> <p>Evolution of textural maturity of Cabernet Franc was assayed throughout ripening using double compression 20% tests. Instead of using berries randomly picked in the vineyard, berries were sampled from whole grape bunches. Results show coherent and significant evolution of double compression parameters: F1, Grad0, Grad1, W1 and gumminess significantly decreased while cohesiveness significantly increased during maturation. Variations in texture were related with major physiological and physical traits. Mechanical parameters differed significantly according to the berry position. Among these parameters, Grad1 was highly correlated with berry density and °Brix (<math>r = -0.91</math> for both), and W1 was highly correlated with water content (<math>r = 0.87</math>). Within grape bunch heterogeneity was illustrated by different distributions of physical, physiological and texture parameters. A negative gradient was shown from the top to the bottom of bunches for dry weight, density, °Brix, cohesiveness, and gumminess. Berries at the distal part of the bunch were more advanced in maturity and were softer compared to the berries at the top.</p> <p>The results are discussed with regard to the sampling strategy in the assessment of grape berry quality based on mechanical properties.</p>
<b>Response to Reviewers:</b>	<p>Dear Editor,</p> <p>Please find attached the third revised paper (AJEV-D-13-00062R3) entitled "Physical and Physiological Heterogeneity Within the Grape Bunch: Impact on Mechanical Properties During Maturation" written by S. Doumouya, M. Lahaye, C. Maury and R. Siret for submission to the American Journal of Enology and Viticulture.</p>

**Physical and Physiological Heterogeneity Within the Grape Bunch: Impact  
on Mechanical Properties During Maturation**

**Doumouya Stéphanie <sup>(1)\*</sup>, Lahaye Marc <sup>(2)</sup>, Maury Chantal <sup>(1)</sup>, Siret René <sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> LUNAM Université, SFR 4207 QUASAV, UMT VINITERA, UPSP GRAPPE, Groupe  
ESA, 55 Rue Rabelais, Angers F-49007, France

<sup>(2)</sup> INRA, UR 1268 BIA, Nantes, rue de la Géraudière, BP 71627, F-44316, Nantes, France

**\*Corresponding author:** Doumouya Stéphanie

Email: s.doumouya@groupe-esa.com

Tel.: +33 2 41 23 55 55

Fax: +33 2 41 23 56 09

**Acknowledgments**

We thank the “Conseil Général du Maine et Loire, France” for financing this project, Gérard Barbeau (INRA, Angers) for helpful discussions, and Sophie Clavier and Gabriela Sepulveda-Paz for their technical assistance.

---

**Abstract**

Mechanical properties are emerging as a complementary criterion to evaluate grape berry quality for wine making. As texture is evaluated on a berry per berry basis it is important to assess the impact of the within grape heterogeneity on mechanical properties.

Evolution of textural maturity of Cabernet Franc was assayed throughout ripening using double compression 20% tests. Instead of using berries randomly picked in the vineyard, berries were sampled from whole grape bunches. Results show coherent and significant evolution of double compression parameters: F1, Grad0, Grad1, W1 and gumminess significantly decreased while cohesiveness significantly increased during maturation. Variations in texture were related with major physiological and physical traits. Mechanical parameters differed significantly according to the berry position. Among these parameters, Grad1 was highly correlated with berry density and °Brix ( $r = -0.91$  for both), and W1 was highly correlated with water content ( $r = 0.87$ ). Within grape bunch heterogeneity was illustrated by different distributions of physical, physiological and texture parameters. A negative gradient was shown from the top to the bottom of bunches for dry weight, density, °Brix, cohesiveness, and gumminess. Berries at the distal part of the bunch were more advanced in maturity and were softer compared to the berries at the top.

The results are discussed with regard to the sampling strategy in the assessment of grape berry quality based on mechanical properties.

**Key words**

Grape bunch, mechanical properties, heterogeneity, physiology, maturation

## 1 **Introduction**

2 The vine (*Vitis vinifera* L.) plays a major role in agribusiness due to its economic and cultural  
3 importance and is the focus of many studies aiming to improve grape quality for the  
4 production of high value wines. Wine quality starts at the vineyard where growers have to  
5 decide on many aspects of vine management that impact grape development.

6 Grape berry growth follows a double sigmoid curve with a lag phase of development  
7 (Ollat et al. 2002). Before veraison, the herbaceous phase corresponds to a period of active  
8 cell division and expansion (Ojeda et al. 1999). After veraison, the maturation stage is  
9 characterized by berry size increase, softening, sugar accumulation, acidity decrease and color  
10 changes (Coombe and McCarthy 2000). These events are associated with the switch from  
11 symplastic to apoplastic downloading of sugars, which contributes to the release of turgor  
12 pressure together with concurrent cell wall disassembly and thinning processes (Thomas et al.  
13 2008). These main physiological events during maturation strongly influence the final quality  
14 of grapes. Therefore, it is important to provide growers with reliable criteria for (i) choosing  
15 the proper harvest date, (ii) assessing the potential quality of the harvest and (iii) selecting the  
16 transformation process to deliver wines suited to the market. The control of maturity is  
17 traditionally followed using classic indicators (sugar, acidity, and pH). In addition, specific  
18 indicators determine the phenolic maturity based on estimates of the phenolic content.  
19 However, growers in the wine sector have realized that these indicators are insufficient as  
20 they only partially represent the quality of grapes.

21 Due to the softening of the berry during grape ripening (Coombe and Philips 1982),  
22 the mechanical properties of berries grouped under the general term "texture" have been  
23 recently introduced as an additional criterion for the overall assessment of grape quality  
24 (Letaief et al. 2008, Maury et al. 2009, Torchio et al. 2010, Rio Segade et al. 2011a, Rolle et  
25 al. 2012). Moreover, observations of cell wall polysaccharide and protein changes (Vincens et

26 al. 2009) as well as the evolution of berry strength and elasticity during grape ripening have  
27 shown a link between berry texture and the extractability of phenolic compounds (Zouid et al.  
28 2010). Such a link would make berry mechanical properties an important factor with regard to  
29 the release and evolution of phenolic compounds during the transformation of grapes into  
30 wine and, thus, to wine quality.

31 Although promising, berry texture is not yet a criterion used by the wine industry for  
32 monitoring grape maturity because of technical and scientific limitations. In particular, the  
33 impact of grape heterogeneity on the measurement of berry mechanical properties is  
34 unknown. Unlike the classic indicators (sugar, acidity, and pH) that give an average value of a  
35 representative batch, texture is measured on isolated berries from a batch. In such  
36 measurements, berry sampling must be representative but is difficult to rationalize. Using a  
37 random sampling approach, the changes observed during ripening process were related to  
38 berry heterogeneity rather than to harvest date (Rolle et al. 2011b). This berry heterogeneity is  
39 present from vine to vine, from bunch to bunch and even from berry to berry in the same  
40 bunch. Such diversity results from the complex developmental processes of berries controlled  
41 by genetic (cultivar and grape rootstock) and environmental (macro-environment perceived  
42 by the plant and micro-environment perceived by berries) factors (Costantini et al. 2008). In  
43 particular, berry development and size rely on water, temperature and trophic relationships  
44 between vine and grape as well as on berry and seed numbers (Roby and Matthews 2004,  
45 Carbonneau et al. 2007). As stated above, the consequences of such heterogeneity on berry  
46 mechanical properties are currently unknown and there is no published work addressing the  
47 assessment of a mechanical method developed to monitor grape ripening (Rolle et al. 2012).  
48 We hypothesized that the position of berries in bunches could also affect their mechanical  
49 properties at harvest. To that end, this study reports on the textural heterogeneity of Cabernet  
50 Franc using whole grape bunches sampling protocol, throughout ripening measured on a berry

51 per berry basis using double compression test. Correlations between the mechanical variables  
52 and major physiological and physical traits provide valuable information to formalize a grape  
53 berry sampling protocol to measure grape textural maturity.

## 54 **Materials and methods**

### 55 *Grape sampling*

56 This study was carried out with grapes of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Franc from the INRA  
57 experimental vineyard of Montreuil-Bellay, Maine et Loire, France (47°07' N latitude and  
58 00°09' W longitude; elevation 60 m above sea level). The vines were oriented north-south  
59 and maintained with the Guyot simple pruning method. Whole grape bunches were collected  
60 in 2011 twice a week between 9:00 and 11:00 a.m. during the 6 weeks from veraison to  
61 harvest resulting in a total of 30 grape bunches analyzed. The sampling dates and the number  
62 of berries per bunch are given in supplementary Table 1. For each date, 3 grapes from 3 vines  
63 (one per vine) with the same evaluated vigor (trunk size) were taken from the middle cane of  
64 the arm. Grapes were collected into polyethylene bags and placed immediately in a container  
65 cooled with ice in the field. Prior to the analysis, repartition of berries according to each  
66 branch of the grape bunch was observed, and the results showed that the relative proportions  
67 of berries situated in the two first branches of the bunch represented approximately a third of  
68 the total number of berries (data not shown). For each date, berries were classified according  
69 to their position into one of three equal classes each representing one third of the total number  
70 of berries. The “top” position corresponded to berries located on the first two lateral branches  
71 at the basal position of the bunch. Positions 2 and 3 corresponded to the berries on branches  
72 located in the “middle” and at the “bottom” of the bunch, respectively (supplementary Figure  
73 1).

### 74 *Mechanical measurements: double compression*

76 Whole berry mechanical properties were assessed using a double compression test (Letaief et  
77 al. 2008, Maury et al. 2009). Textural analyses were performed using a Synergy 200H  
78 texturometer (MTS Universal). Berries were compressed twice at their equator by two parallel  
79 plates. Deformation was set at 20% of their height and was achieved at 50 mm/min plate  
80 displacement. Seven parameters were extracted from the force/deformation curve according to  
81 Zouid et al. (2010): Hardness (N) was associated with the first (F1) and second (F2)  
82 compression, and work W1 and W2 (mJ) were associated with F1 and F2, respectively. The  
83 slope (N/mm) at the beginning, at the first and at the second compression was represented by  
84 Grad0, Grad1 and Grad2, respectively. Two secondary parameters were also studied as  
85 follows: cohesiveness (adimensional), which is the ratio between W2 and W1, and  
86 gumminess (N), which is the product of F1 and cohesiveness.

87

#### 88 *Physical and physiological measurements*

89 Berries were weighed before the texture tests, and fresh weight was expressed in grams (g).  
90 Height (mm) was a parameter automatically calculated by the texturometer prior to the double  
91 compression test. The density of each berry was estimated by flotation in solutions of 90, 100,  
92 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190 and 200 g/L sodium chloride (NaCl) (Fournand et  
93 al. 2006). After density determination, berries were rinsed with tap water to remove salt,  
94 drained on paper, frozen at -80 °C for 2 h and freeze-dried for 48 h. The berries were then  
95 weighed to determine the dry weight in grams (g). The water content (mL) that was initially  
96 present in the berry was obtained from the weight difference between fresh weight and dry  
97 weight, and the percentage of water was based on the percentage of fresh weight (% of fresh  
98 weight). The number and weight (mg) of the seeds were then measured in each berry. The  
99 remaining skin and pulp were milled and suspended in a fixed volume (4 mL) of distilled  
100 water to determine °Brix by refractometry. The real °Brix value present in the berry was then

101 calculated by proportionality knowing the water content in each berry. °Brix is directly related  
102 to sugar content (g/L) (Fournand et al. 2006).

103

#### 104 *Statistical analyses*

105 All statistical analyses were performed using Statgraphics Plus 5.1 software. The data were  
106 processed by analysis of variance (ANOVA) and different statistical groups were  
107 differentiated by the Fisher LSD test (Least Significant Difference). Pearson coefficients of  
108 correlation were calculated between all variables.

109

## 110 **Results**

### 111 *Characterization of the variability of mechanical properties within a Cabernet Franc grape* 112 *bunch at harvest*

113 To assess berry texture at maturity, double compression tests were performed. All mean  
114 values of double compression parameters are shown in Table 1 for berries at the three  
115 positions in the bunch. Hardness F1 and F2 values decreased from 2.63 to 2.49 N and from  
116 2.35 to 2.22 N, respectively, at the top of the bunch to at the bottom of the bunch. Values of  
117 F2 were lower than F1, indicating that the berry did not find its original state after the first  
118 compression, thereby reflecting a relatively low elastic global behavior. The Grad0 parameter,  
119 which is representative of the berry elastic response before compression, decreased from the  
120 top to the bottom of the bunch ( $p < 0.001$ ). There were no significant differences for the Grad2  
121 parameter according to the position class, but Grad1 increased significantly from 1.32 to 1.39  
122 N/mm ( $p < 0.05$ ). There was a significant drop in the energy needed during the first (W1) and  
123 second (W2) compression between the top and bottom positions in the bunch. The secondary  
124 parameter of gumminess remained constant regardless of the position of berries, but the  
125 cohesiveness parameter increased from the top to the bottom of the bunch ( $p < 0.01$ ).

126 According to Bourne (2002), this parameter relates to the rupture of the tissue after the first  
127 compression. A Fisher's least significant test (LSD) showed significant differences for berries  
128 located on the extreme positions of the bunch (top and bottom). However, the mean values of  
129 the middle position were not significantly different, but they were closer to those at the top or  
130 at the bottom position depending on the compression parameters considered. Correlations  
131 between double compression parameters at harvest time were calculated (supplementary  
132 Table 2). A positive correlation existed with a high significance between parameters related  
133 to the first compression with parameters related to the second compression (F1 and F2:  
134  $r=1.00$ ; Grad1 and Grad2:  $r=0.87$ ; W1 and W2:  $r=0.96$ ). With the objective of reducing the  
135 data to non-redundant parameters, only those data related to the first compression (F1, W1,  
136 Grad0 and Grad1) and the secondary parameters, cohesiveness and gumminess, will be used  
137 in the rest of this work.

138

### 139 *Evolution of the double compression parameters during maturation*

140 To determine when changes in texture behavior occur, double compression parameters were  
141 analyzed at ten different dates throughout ripening. All of these values generally decreased  
142 (Figure 1). Parameters related to berry firmness, namely F1 and W1, followed a sigmoid-like  
143 decreasing curve. After a marked decrease between the first and second sampling dates, F1  
144 and W1 values nearly plateaued until mid-maturation and then sharply decreased again  
145 (Figure 1A and 1B). At maturity, the loss of strength and energy compared to the beginning of  
146 maturation was approximately 38 and 37%, respectively. Trends of Grad0 and cohesiveness  
147 values decreased and increased, respectively, during the maturation phase (Figure 1C and  
148 1D). Two distinct phases were observed for Grad1 (Figure 1E) as follows: a major decrease  
149 was observed between 17 to 24 days post-veraison and the value nearly plateaued after this  
150 time. The curve for the gumminess parameter (Figure 1F) showed a steady and almost linear

151 decrease from 1.77 to 1.33 N/mm throughout the ripening period, which corresponded to a  
152 decrease of nearly 24%.

153

#### 154 *Evolution of main physical and physiological parameters during maturation*

155 The mean values of each physical and physiological parameter measured for berries at ten  
156 different ripening dates are shown in Figures 2 and 3, respectively. Height, fresh weight and  
157 berry volume increased similarly until the middle of ripening and then decreased (Figure 2A,  
158 2B and 2C). The curve for the dry weight (Figure 2D) increased sharply until 29 days post-  
159 veraison followed by a more moderate increase. Water content values were constant during  
160 the first half of the curve (close to 0.97 mL/berry) and then decreased to 0.70 mL/berry at the  
161 end of the ripening stages (Figure 3A). This loss of water could explain the decreasing values  
162 of height, fresh weight and berry volume. The percentage of water decreased continuously  
163 from 81 to 72%, and the density and °Brix showed the same curve profile with the expected  
164 significant increase (Figure 3B, 3C and 3D). Density and °Brix were close to 110 g/L NaCl  
165 and 17, respectively, at the first date, and they reached 160 g/L NaCl and 24, respectively,  
166 near the harvest date. The shape of the curves showed that the evolution of density and °Brix  
167 during maturation occurred in two different phases. During the first half of the ripening phase  
168 (from 17 to 29 days post-veraison), these parameters increased rapidly and then slowed down  
169 at mid-maturation before resuming a marked increase until harvest time. It should be noted  
170 that the transition between the two phases occurred when the berries started to lose water.

171

#### 172 *Correlations between physical, physiological and mechanical data*

173 The correlation coefficients of all mean parameters throughout ripening are shown in Table 2.  
174 Berry size parameters (fresh weight, height and berry volume) were highly and positively  
175 correlated with each other ( $r = 0.89$  to  $0.99$ ). As reported in the literature, berry size also

176 correlated with seed number and weight (Ebadi et al. 2009). The correlation between density  
177 and °Brix was high ( $r = 0.99$ ) and confirmed the usefulness of berry density as an indicator of  
178 the amount of solutes (Fournand et al. 2006, Kontoudakis et al. 2011). Dry weight was highly  
179 and positively correlated with density and °Brix ( $r = 0.80$  and  $0.76$ , respectively). These three  
180 factors were highly and negatively correlated with the percentage of water (results ranged  
181 from  $-0.74$  to  $-0.99$ ). Firmness parameters (F1 and W1) correlated highly and positively with  
182 berry size ( $r = 0.64$  to  $0.81$ ) and negatively correlated with density and °Brix ( $r = -0.67$  to -  
183  $0.84$ ). High correlations were found between all berry textural parameters and the percentage  
184 of water ( $r = -0.66$  to  $0.90$ ). The highest correlation found between a texture parameter and a  
185 physiological parameter was for Grad1 with density and °Brix ( $r = -0.91$  for both).

186

187 *Effect of the position within the grape bunch on berry physical, physiological and texture*  
188 *parameters during ripening*

189 An analysis of variance (ANOVA) was performed for each physical, physiological and  
190 mechanical parameter according to the berry position in the bunch for three different periods  
191 of the maturation as follows: beginning of the maturation (from 17 to 24 days post-veraison),  
192 mid-maturation (from 29 to 36 days post-veraison) and end of maturation (from 38 to 50 days  
193 post-veraison) (Table 3). The following two different patterns emerged: a positive gradient  
194 where values at the top of the bunch were significantly higher than values at the bottom of the  
195 bunch and a negative gradient where values at the bottom of the bunch were significantly  
196 higher than values at the top of the bunch. Regardless of the type of gradient, the position  
197 effect was more pronounced in early and late maturing grapes with 9 and 10 significantly  
198 different parameters, respectively, as compared to mid-maturation, which only had four  
199 significantly different parameters. Among the physical parameters, height and berry volume  
200 showed a positive gradient from the top to the bottom of the bunch at the beginning of

201 maturation, and no gradient was observed at the end of maturation, thereby suggesting a  
202 tendency of homogenization. Grad0 and cohesiveness were always significantly different  
203 regardless of the position of the bunch and maturation period. All textural parameters were  
204 significantly influenced by the position effect at the end of maturation. For the physiological  
205 parameters, no significant position effect was observed for water content for all ripening  
206 phases. °Brix showed a significant position effect at the end of maturation with increasing  
207 values from top to bottom of the bunch. Density was highly influenced by the berry position,  
208 especially at the end of maturation ( $p < 0.001$ ), with higher mean values at the bottom than at  
209 the top position.

210 To consider berry density heterogeneity within a bunch, a distribution curve of density at the  
211 end of maturation according to position is shown in Figure 4. Density values at each position  
212 distributed as three Gaussian bell-shaped curves were centered at 150, 170 and 190 g/L equiv  
213 NaCl but in different proportions. Approximately 40% of the berries reached a density of 170  
214 g/L equiv NaCl at the bottom and middle positions as compared to only 25% of the berries at  
215 the top of the bunch. Conversely, the top bunch position had a higher percentage of less  
216 mature berries ( $< 150$  g/L equiv NaCl), and no significant differences were found among these  
217 three positions in their proportions of the most mature berries ( $> 190$  g/L equiv NaCl).

218 The middle position of the bunch was an intermediate position between the extreme values at  
219 the top and bottom positions of the bunch. A comparison test of whole grape bunch sampling  
220 and middle position berry sampling was realized (supplementary Table 3). For all the  
221 parameters studied, the results showed no significant differences between the two types of  
222 samples, which confirmed that berries at the middle position are highly representative of the  
223 entire bunch heterogeneity.

224

## 225 **Discussion**

---

226 *The role of water dynamics in sugar accumulation and berry texture*

227 The comprehension of factors implied in evolution of berry texture is important, but few  
228 studies have combined different parameters, such as physiological, physical and textural  
229 measurements. Moreover, no studies have taken into account the position as a factor of  
230 heterogeneity for all of these parameters in grape bunches. In this study, the evolution of  
231 berry texture through ripening was analyzed to identify when changes in texture behavior  
232 occur. Several physical and physiological parameters were also studied to evaluate their  
233 contribution to texture changes. As previously reported (Maury et al. 2009), ripening of  
234 Cabernet Franc grapes highly and significantly impacts the mechanical properties of berries.  
235 Berry firmness was observed to decrease from the beginning to the end of maturation in two  
236 phases separated by a plateau at mid-maturation. After mid-maturation, berry water loss was  
237 concomitant with firmness decline (F1 and W1). This result and the high correlation  
238 coefficient between W1 and water content ( $r= 0.81$ ) supported a major role of water in  
239 texture. Similar to any other fleshy fruit, softening of grape berries during maturation involves  
240 cell wall structure modifications and loss of turgor pressure (Thomas et al. 2008). Turgor  
241 pressure is a fundamental determinant of plant tissue mechanical properties (Bruce, 2003) and  
242 is counteracted by the cell wall. In tomato, fruit softening results from the early loss of turgor  
243 pressure and the concurrent cell wall disassembly (Saladié et al. 2007). Several studies on  
244 fleshy fruits (honeydew melon, cucumber, pumpkin, and tomato) have supported the  
245 relationship between cell turgor pressure and tissue firmness (Rojas et al. 2001, Sajnín et al.  
246 2003, Mayor et al. 2006). Grapevine berry elasticity obeys the same relationship with turgor  
247 pressure (Thomas et al. 2008). Using a compression test, these authors showed that the  
248 apparent elasticity of the grape berries (cv. Pinot Noir and Chardonnay) increases from 6 to 9  
249 MPa during the first phase of development and decreases to approximately 2 MPa at veraison  
250 where it remains constant during berry ripening. Matthews et al. (2009) showed that limiting

251 berry transpiration and expansion delays the loss of turgor pressure and accumulation of sugar  
252 and anthocyanins in *Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir and Cabernet Sauvignon. These authors  
253 suggested that the loss of turgor pressure in the berry mesocarp might play a major role in  
254 signaling the onset of ripening in grape berries. With regard to water deficit, Roby et al.  
255 (2004) showed that Cabernet Sauvignon grape berries grown under water stress conditions  
256 have thicker skins. Moreover, the berry skin, especially its thickness, influences the  
257 measurement of texture (Rolle et al. 2012).

258 In our study, berries had increased sugar concentration during maturation (Coombe and  
259 McCarthy 2000). This accumulation involved two phases that were closely related to water  
260 dynamics. Changes in density and °Brix at the beginning of maturation can be explained by  
261 an accumulation of solutes without loss of water because its content remained constant. In the  
262 second phase, the increase is related to the loss of water due to the decrease in xylem water  
263 influx (Greenspan et al. 1996) or transpiration (Rogiers et al. 2004). In a generalized model of  
264 vascular functioning during berry development, Coombe and McCarthy (2000) described the  
265 xylem as becoming non-functional after veraison because of the decline in its hydraulic  
266 conductance. However, apoplastic dye unloading from the xylem of post-veraison berries  
267 demonstrates that the xylem remains structurally intact throughout berry development  
268 (Bondada et al. 2005). The apoplastic phloem unloading and solute accumulation in the berry  
269 apoplast are likely responsible for the decline in xylem water influx into post-veraison berries  
270 (Keller et al. 2006).

271

272 *Berry position within the grape bunch affects physical, physiological and texture parameters*

273 Berry position in the bunch is a factor of heterogeneity. Two different patterns emerged in this  
274 study. First, a positive gradient from top to bottom of the bunch showed that upper berries  
275 were statistically harder with percentage of water relative to fresh weight being more

276 important than berries at the bottom of the bunch (Table 3). Conversely, a negative gradient  
277 from bottom to top of the bunch showed that the distal position led to softer berries with  
278 higher °Brix. Berry fruit variability depending on the position in the bunch has already been  
279 demonstrated in tomato (Bertin et al. 2001). Bohner and Bangerth (1988) showed that size  
280 differences between proximal and distal fruits in a tomato truss at maturity are due to  
281 differences in the cell number of the pollinated ovaries at anthesis. In banana, Jullien et al.  
282 (2001) showed that flowering and pollination start at the top of the bunch initiating the lead in  
283 berry formation and ripening over the lower parts. In grape berries, gradients could result  
284 from the different abilities of berries to receive assimilates of photosynthesis through the  
285 phloem stream, but this hypothesis remains to be confirmed. Instead, initiation of flowering is  
286 known to be shifted between the upper and lower part of the bunch and is affected by climate  
287 conditions (Ewart and Kliewer 1977; Ebadi et al. 1995). Low temperature (<20 °C) and  
288 precipitation induce a flowering spread in time and flower abortion phenomena, which can  
289 lead to the development of gaps between the berries and gradients of berry development in the  
290 same bunch. In this study, the meteorological conditions the week before mid-flowering (21  
291 May 2011) had an average daily temperature of 16 °C without precipitation. This low  
292 temperature may have increased the offsets of flowering between the top and bottom position  
293 of the bunch leading to the heterogeneity of °Brix and density values observed in the berries.  
294 Unexpectedly, this heterogeneity did not linearly impact the proportion of the fully ripe  
295 berries (>190 g/L) at the three positions but rather the proportions of well-ripe and unripe  
296 berries (<150 g/L) (Figure 4).

297

### 298 *Texture as a quality criterion of grape maturation*

299 The present work monitored grape ripening by double compression tests. Mean values of each  
300 parameter significantly changed throughout ripening process. F1, Grad0, Grad1, W1 and

301 gumminess decreased while cohesiveness increased during maturation. Positive correlations  
302 were observed between hardness (F1) and berry size as well as water-related factors (water  
303 content and percent of water), and high negative relationships were observed between F1 and  
304 °Brix as well as F1 and density. Previous studies only showed decreasing trends of  
305 mechanical parameters with sugar accumulation without statistically significant correlations  
306 (Zouid et al. 2010; Rio Segade et al. 2011a; Rolle et al. 2012). Our results suggested that  
307 within the harvest, softer berries had higher °Brix and were smaller in size and weight.  
308 Genetic variability of berry size in grapevine involves ovary and early berry development  
309 factors. Cell divisions before and after anthesis as well as cell expansion after anthesis are  
310 major determinants of flesh weight variation between varieties (Houet 2011). Seed number  
311 and weight also control berry size (Ollat et al. 2002). As expected, the seed number in this  
312 study did not vary among different ripening dates even though each date corresponded to  
313 different grapes (data not shown), which indicated comparable pollination between bunches in  
314 the vineyard.

315 Several studies have evaluated the mechanical behavior of maturing berries in the vineyard.  
316 Generally, only slight changes have been observed, and the trend of compression parameters  
317 is rather irregular (Maury et al. 2009, Zouid et al. 2010). In these studies, the authors sampled  
318 up to 450 berries throughout the vineyard representing three to five berries per bunch, and  
319 they then randomly selected 30 to 50 berries from the batch to carry out texture analysis. The  
320 present work showed that the position of the berry picking in the bunch is important as it can  
321 be affected by both maturation and within bunch heterogeneity. Instead sampling whole grape  
322 bunches, as realized in this study, an alternative and more realistic sampling would be to  
323 analyze berries in the middle part of randomly chosen bunches in the vineyard. Indeed, a  
324 comparison test of whole grape bunch sampling and middle position berry sampling showed  
325 no significant differences between the mean values of all the parameters studied (physical,

---

326 physiological and textural) regardless of the ripening date (supplementary Table 3). Thus,  
327 such sampling would be representative of the general behavior of the whole grape bunch.

328

## 329 **Conclusion**

330 This study clearly supports the high value of texture as a quality criterion for grape maturity  
331 in revealing several correlations between berry mechanical features and key physical and  
332 physiological characteristics for grape quality assessment. This work mapped the mechanical,  
333 physical and physiological heterogeneity within a grape bunch during maturation and  
334 proposed sampling strategies to improve the use of this test in the vineyard. As for other grape  
335 varieties, these results confirmed the dominant role of water in the loss of firmness during  
336 maturation of Cabernet Franc. Further work will consider sun exposure on within bunch berry  
337 heterogeneity.

338

339 **Tables**

340

341

342

343

344

**Table 1** Double compression parameter values (mean  $\pm$  standard error) and ANOVA (F-ratio and  $p$ -value) of berries at harvest date according to their position in the bunch. Different letters indicate significant differences between values from berries at different positions; ns = non-significant.

Textural parameter	Position			Position effect	
	Bunch Top n=103	Bunch middle n=135	Bunch bottom n=111	F-ratio	$p$ -value
F1 (N)	2.63 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	2.55 $\pm$ 0.03 <sup>ab</sup>	2.49 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	4.41	<0.05
F2 (N)	2.35 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	2.27 $\pm$ 0.03 <sup>ab</sup>	2.22 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	4.9	<0.01
Grad0 (N/mm)	0.55 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.50 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.48 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	8.79	<0.001
Grad1 (N/mm)	1.32 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.33 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.39 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	4.04	<0.05
Grad2 (N/mm)	2.86 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	2.81 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	2.86 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	0.75	ns
W1 (mJ)	1.84 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	1.70 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	1.61 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	9.12	<0.001
W2 (mJ)	0.65 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.61 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.59 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	6.4	<0.01
Cohesiveness	0.360 $\pm$ 0.003 <sup>a</sup>	0.361 $\pm$ 0.003 <sup>a</sup>	0.375 $\pm$ 0.003 <sup>b</sup>	6.1	<0.01
Gumminess (N)	0.94 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.92 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.92 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.07	ns

345  
346  
347  
348

**Table 2** Correlation coefficients between physical, physiological and textural parameters during maturation. Results are based on mean values (n =10). Significant correlations are in bold; Significant correlations at \*\*p < 0.01; and \*p<0.05.

Parameter	Height	Berry volume	Fresh weight	Dry weight	Seed number	Seed weight	Density	°Brix	Water content	% water	F1	Grad0	Grad1	W1	Cohesive-ness	Gummi-ness
Height	–															
Berry volume	<b>0.99**</b>	–														
Fresh weight	<b>0.93**</b>	<b>0.89**</b>	–													
Dry weight	0.26	0.29	0.27	–												
Seed number	<b>0.67**</b>	<b>0.65*</b>	0.61	0.11	–											
Seed weight	<b>0.76**</b>	<b>0.76**</b>	<b>0.79**</b>	0.32	0.58	–										
Density	-0.36	-0.32	-0.35	<b>0.80**</b>	-0.30	-0.21	–									
°Brix	-0.40	-0.36	-0.37	<b>0.76**</b>	-0.33	-0.24	<b>0.99**</b>	–								
Water content	<b>0.87**</b>	<b>0.81**</b>	<b>0.93**</b>	-0.10	0.62	<b>0.69**</b>	<b>-0.67**</b>	<b>-0.67**</b>	–							
% water	0.42	0.36	0.44	<b>-0.74**</b>	0.32	0.24	<b>-0.99**</b>	<b>-0.98**</b>	<b>0.73**</b>	–						
F1	<b>0.65*</b>	0.61	<b>0.64*</b>	-0.44	0.39	0.32	<b>-0.83**</b>	<b>-0.84**</b>	<b>0.83**</b>	<b>0.87**</b>	–					
Grad0	0.67	0.60	<b>0.74**</b>	-0.18	0.46	0.28	-0.61	-0.57	<b>0.84**</b>	<b>0.68**</b>	<b>0.88**</b>	–				
Grad1	0.21	0.18	0.18	<b>-0.81**</b>	0.17	0.04	<b>-0.91**</b>	<b>-0.91**</b>	0.50	<b>0.90**</b>	<b>0.84**</b>	0.57	–			
W1	<b>0.81**</b>	<b>0.78**</b>	<b>0.77**</b>	-0.18	0.47	0.42	<b>-0.67**</b>	<b>-0.67**</b>	<b>0.87**</b>	<b>0.73**</b>	<b>0.95**</b>	<b>0.92**</b>	<b>0.64*</b>	–		
Cohesiveness	-0.53	-0.48	-0.53	0.31	-0.35	-0.16	0.62	0.60	<b>-0.66*</b>	<b>-0.66*</b>	<b>-0.86**</b>	<b>-0.88**</b>	<b>-0.67**</b>	<b>-0.87**</b>	–	
Gumminess	<b>0.67**</b>	<b>0.63*</b>	<b>0.67**</b>	-0.41	0.37	0.39	<b>-0.82**</b>	<b>-0.84**</b>	<b>0.85**</b>	<b>0.87**</b>	<b>0.93**</b>	<b>0.76**</b>	<b>0.77**</b>	<b>0.87**</b>	-0.62	–

349  
350  
351  
352**Table 3** Physical and physiological parameters of berries (mean  $\pm$  standard deviation) according to their position in the bunch at three different ripening phases. Different letters indicate significant differences (ANOVA) between values from berries at different positions. ns= non-significant.

Parameter	Date											
	Beginning of maturation				Mid-maturation				End of maturation			
	Top (n=298)	Middle (n=295)	Bottom (n=281)	<i>P</i>	Top (n=313)	Middle (n=322)	Bottom (n=312)	<i>P</i>	Top (n=358)	Middle (n=363)	Bottom (n=368)	<i>P</i>
Fresh weight (g)	1.22 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.23 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.22 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	ns	1.27 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.28 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.31 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	ns	1.16 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.14 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.14 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	ns
Dry weight (g)	0.27 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.26 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.26 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	ns	0.30 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.31 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.32 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	ns	0.32 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.31 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.32 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	ns
Height (mm)	12.39 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	12.29 $\pm$ 0.05 <sup>ab</sup>	12.18 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	<0.05	12.58 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	12.46 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	12.43 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	ns	12.04 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	11.93 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	12.04 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	ns
Berry volume (mm <sup>3</sup> )	1015.1 $\pm$ 13.7 <sup>b</sup>	988.3 $\pm$ 13.8 <sup>ab</sup>	966.3 $\pm$ 14.1 <sup>a</sup>	<0.05	1065.5 $\pm$ 14.1 <sup>a</sup>	1030.9 $\pm$ 13.9 <sup>a</sup>	1027.3 $\pm$ 14.0 <sup>a</sup>	ns	937.7 $\pm$ 17.8 <sup>a</sup>	917.4 $\pm$ 17.7 <sup>a</sup>	968.5 $\pm$ 17.6 <sup>a</sup>	ns
Number of seeds	1.40 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	1.39 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	1.33 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	ns	1.40 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	1.35 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	1.42 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	ns	1.41 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	1.29 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.33 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	<0.05
Seeds weight (mg)	34.9 $\pm$ 0.9 <sup>a</sup>	38.5 $\pm$ 0.9 <sup>b</sup>	36.6 $\pm$ 0.9 <sup>ab</sup>	<0.05	39.90 $\pm$ 1.03 <sup>a</sup>	38.41 $\pm$ 1.01 <sup>a</sup>	41.99 $\pm$ 1.02 <sup>b</sup>	<0.05	36.98 $\pm$ 0.81 <sup>a</sup>	35.75 $\pm$ 0.80 <sup>a</sup>	37.91 $\pm$ 0.80 <sup>a</sup>	ns
Density (g/l)	121.59 $\pm$ 0.88 <sup>a</sup>	124.16 $\pm$ 0.90 <sup>b</sup>	126.13 $\pm$ 0.92 <sup>b</sup>	<0.01	146.03 $\pm$ 0.62 <sup>a</sup>	146.39 $\pm$ 0.61 <sup>a</sup>	148.83 $\pm$ 0.62 <sup>b</sup>	<0.01	168.42 $\pm$ 0.60 <sup>a</sup>	167.93 $\pm$ 0.60 <sup>a</sup>	171.06 $\pm$ 0.60 <sup>b</sup>	<0.001
°Brix	18.88 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>	19.06 $\pm$ 0.22 <sup>a</sup>	18.70 $\pm$ 0.22 <sup>a</sup>	ns	23.45 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>	23.40 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>	23.06 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>	ns	24.69 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>	24.57 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>	25.58 $\pm$ 0.21 <sup>b</sup>	<0.01
Water content (mL)	0.97 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.97 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.95 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	ns	0.96 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.96 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.98 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	ns	0.84 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	0.83 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	0.82 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	ns
% of water (% of fresh weight)	79.09 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	78.65 $\pm$ 0.014 <sup>a</sup>	78.41 $\pm$ 0.014 <sup>a</sup>	<0.01	75.81 $\pm$ 0.16 <sup>a</sup>	75.56 $\pm$ 0.16 <sup>a</sup>	75.45 $\pm$ 0.16 <sup>a</sup>	ns	72.59 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	72.50 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	71.65 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	<0.001
F1 (N)	3.27 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	3.14 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	3.01 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	<0.001	2.89 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	2.91 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	2.85 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	ns	2.63 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	2.52 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	2.57 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	<0.01
Grad0 (N/mm)	0.68 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	0.61 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.56 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	<0.001	0.67 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	0.65 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.61 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	<0.001	0.54 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	0.49 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.47 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	<0.001
Grad1 (N/mm)	1.56 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.55 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.56 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	ns	1.37 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.39 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.37 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	ns	1.27 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.31 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	1.41 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	<0.001
W1 (mJ)	2.48 $\pm$ 0.04 <sup>c</sup>	2.25 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	2.09 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	<0.001	2.12 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	2.12 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	2.04 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	ns	1.78 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	1.69 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	1.79 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	<0.05
Cohesiveness	0.339 $\pm$ 0.001 <sup>a</sup>	0.355 $\pm$ 0.001 <sup>b</sup>	0.368 $\pm$ 0.002 <sup>c</sup>	<0.001	0.347 $\pm$ 0.001 <sup>a</sup>	0.347 $\pm$ 0.001 <sup>a</sup>	0.356 $\pm$ 0.001 <sup>b</sup>	<0.001	0.371 $\pm$ 0.002 <sup>a</sup>	0.373 $\pm$ 0.002 <sup>a</sup>	0.384 $\pm$ 0.002 <sup>b</sup>	<0.001
Gumminess (N)	1.09 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.10 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.09 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	ns	1.00 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.00 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	1.01 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	ns	0.94 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.93 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.99 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	<0.001

353  
354

355 **Figures**

356

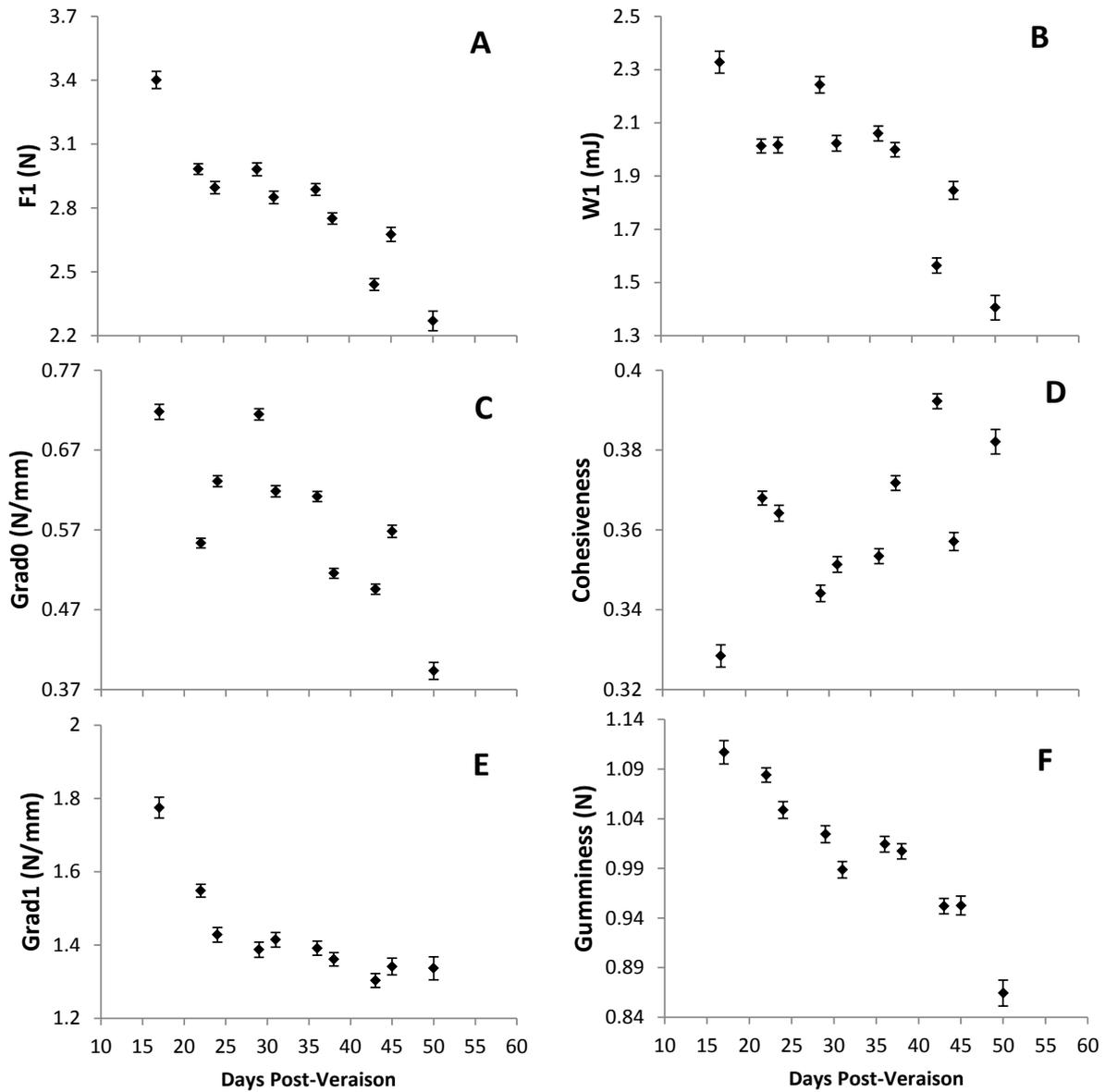
357

358

359

360

361



362

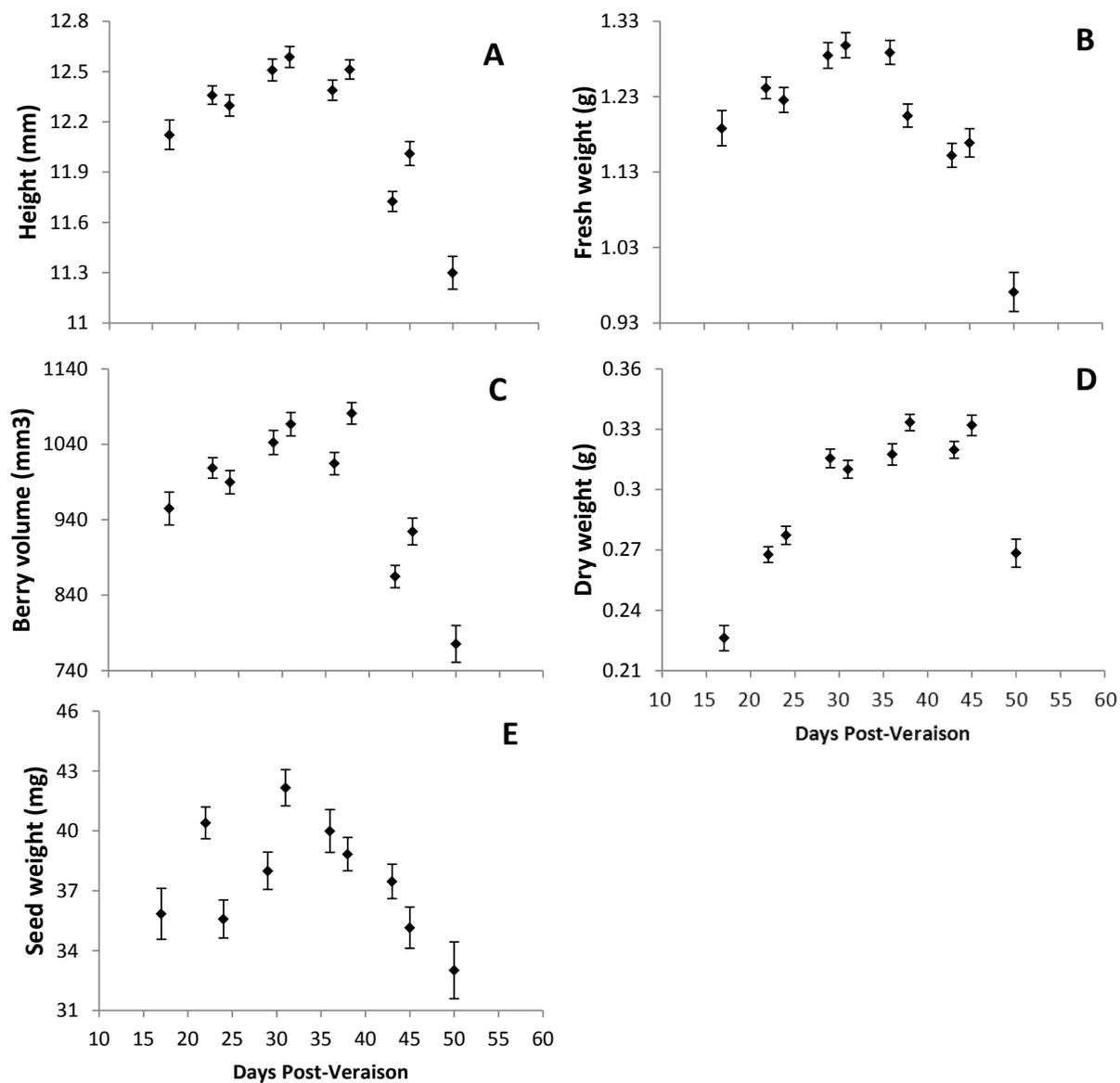
363

364

365

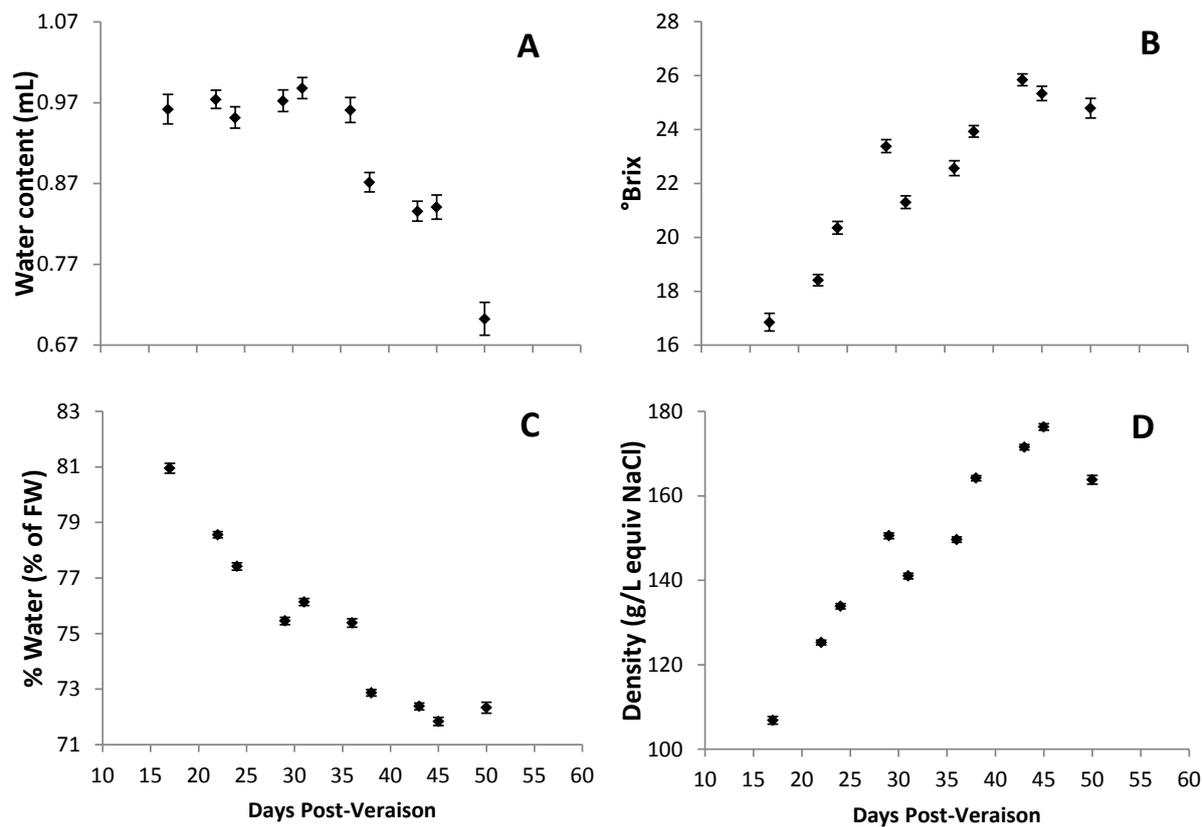
366

**Figure 1.** Changes of textural parameters throughout ripening (mean  $\pm$  standard deviation): (A) F1 (N); (B) W1 (mJ); (C) Grad0 (N/mm); (D) Cohesiveness; (E) Grad1 (N/mm); and (F) Gumminess (N).



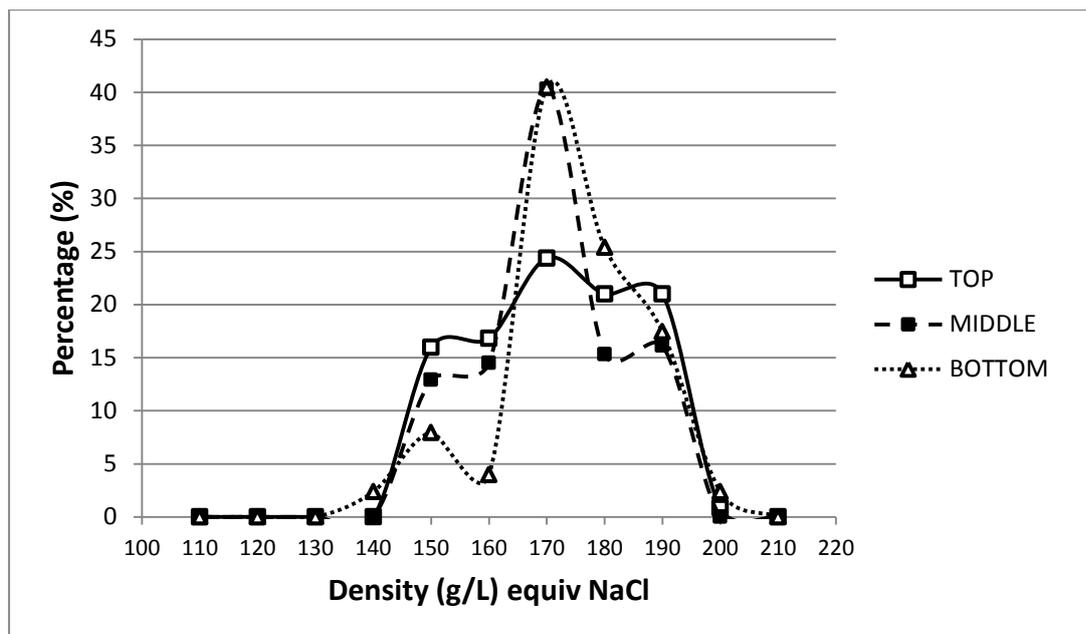
367  
 368  
 369  
 370  
 371  
 372  
 373  
 374  
 375  
 376

**Figure 2.** Changes of physical parameters throughout ripening (mean  $\pm$  standard deviation): (A) Height (mm); (B) Fresh weight (g); (C) Berry volume (mm<sup>3</sup>); (D) Dry weight (g); and (E) Seed weight (g).



377  
 378  
 379 **Figure 3.** Changes of physiological parameters throughout ripening (mean  $\pm$  standard  
 380 deviation): (A) Water content (mL); (B) °Brix; (C) %Water (% of fresh weight); and (D)  
 381 Density (g/L equiv NaCl).

382  
 383  
 384  
 385



386  
387  
388  
389  
390

**Figure 4.** Distribution curves of berry densities according to their position in the bunch at maturity.

391

**Supplementary data****392 Supplementary tables**

393

394

**Supplementary Table 4** Number of berries per bunch harvested during the ripening period.

395

		Vintage 2011	
Date of mid-flowering		21-May-11	
Date of mid-veraison		31-Jul-11	
Sampling date	Days post-veraison	Bunch number	Number of berries per bunch
17-Aug-11	17	1	158
		2	122
		3	165
22-Aug-11	22	4	97
		5	145
		6	131
24-Aug-11	24	7	84
		8	96
		9	88
29-Aug-11	29	10	111
		11	95
		12	104
31-Aug-11	31	13	101
		14	108
		15	124
05-Sep-11	36	16	121
		17	101
		18	119
07-Sep-11	38	19	137
		20	116
		21	106
12-Sep-11	43	22	125
		23	117
		24	130
14-Sep-11	45	25	111
		26	128
		27	158
19-Sep-11	50	28	122
		29	165
		30	97

396

397

398 **Supplementary Table 5** Pearson coefficient of correlations between textural parameters at harvest time.  
 399 Significant correlations at  $p < 0.05$  are in bold;  $n = 349$ .

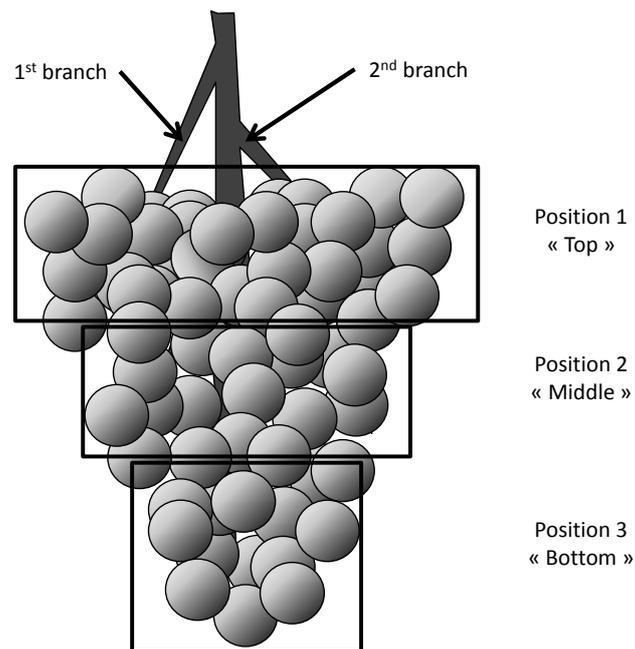
Parameter	F1	F2	Grad0	Grad1	Grad2	W1	W2	Cohesiveness	Gumminess
F1	-								
F2	<b>1.00</b>	-							
Grad0	<b>0.62</b>	<b>0.62</b>	-						
Grad1	<b>0.67</b>	<b>0.65</b>	<b>0.30</b>	-					
Grad2	<b>0.87</b>	<b>0.86</b>	<b>0.49</b>	<b>0.87</b>	-				
W1	<b>0.90</b>	<b>0.89</b>	<b>0.59</b>	<b>0.34</b>	<b>0.64</b>	-			
W2	<b>0.85</b>	<b>0.86</b>	<b>0.48</b>	<b>0.28</b>	<b>0.54</b>	<b>0.96</b>	-		
Cohesiveness	<b>-0.58</b>	<b>-0.55</b>	<b>-0.65</b>	<b>-0.23</b>	<b>-0.54</b>	<b>-0.61</b>	<b>-0.40</b>	-	
Gumminess	<b>0.85</b>	<b>0.87</b>	<b>0.36</b>	<b>0.63</b>	<b>0.69</b>	<b>0.71</b>	<b>0.81</b>	<b>-0.10</b>	-

400

401

**Supplementary Table 6** Comparison test between whole grape bunch sampling and middle position berry sampling across ripening. ns = non-significant

	Mean value $\pm$ Standard deviation		<i>t</i> test	Probability	Significance
	Whole bunch sampling	Middle position sampling			
Height (mm)	12.25 $\pm$ 1.15	12.21 $\pm$ 1.06	0.86	0.38	ns
Berry volume (mm <sup>3</sup> )	989.20 $\pm$ 286.02	976.94 $\pm$ 259.27	1.24	0.21	ns
Fresh weight (g)	1.22 $\pm$ 0.30	1.21 $\pm$ 0.29	0.19	0.84	ns
Density (g/l equiv NaCl)	147.37 $\pm$ 22.98	146.78 $\pm$ 22.17	0.72	0.46	ns
Seed number	1.37 $\pm$ 0.56	1.35 $\pm$ 0.54	1.34	0.17	ns
Seed weight (mg)	37.77 $\pm$ 16.58	37.47 $\pm$ 15.45	0.51	0.6	ns
Dry weight (g)	0.29 $\pm$ 0.08	0.29 $\pm$ 0.08	0	0.99	ns
Water content (ml)	0.92 $\pm$ 0.24	0.92 $\pm$ 0.23	-0.05	0.95	ns
%Water (% of fresh weight)	75.42 $\pm$ 3.86	75.48 $\pm$ 3.68	-0.45	0.64	ns
$^{\circ}$ Brix	22.42 $\pm$ 5.13	22.39 $\pm$ 4.83	0.2	0.83	ns
F1 (N)	2.86 $\pm$ 0.61	2.85 $\pm$ 0.53	0.72	0.44	ns
Grad0 (N/mm)	0.58 $\pm$ 0.14	0.58 $\pm$ 0.13	0.77	0.43	ns
Grad1 (N/mm)	1.42 $\pm$ 0.33	1.41 $\pm$ 0.29	0.57	0.56	ns
W1 (mJ)	2.03 $\pm$ 0.68	2.01 $\pm$ 0.62	1.09	0.27	ns
Cohesiveness	0.36 $\pm$ 0.03	0.35 $\pm$ 0.03	0.99	0.31	ns
Gumminess (N)	1.02 $\pm$ 0.16	1.01 $\pm$ 0.15	1.12	0.26	ns

**Supplementary Figure**

**Supplementary Figure 59.** Diagram representing the classification of berries according to their position in the bunch.

## Literature Cited

1. Bertin, N., M. Buret, and C. Gary. 2001. Insights into the formation of tomato quality during fruit development. *J. Hortic Sci and Biotech* 76: 786-792.
2. Bohner, J., and F. Bangerth. 1988. Effects of fruit set sequence and defoliation on cell number, cell size and hormone levels of tomato fruits (*Lycopersicon esculentum Mill.*) within a truss. *Plant Growth Regul.* 7: 141-155.
3. Bondada, B.R., M.A. Matthews, and K.A. Shackel. 2005. Functional xylem in the post veraison grape berry. *J. Exp. Bot.* 56: 2949-2957.
4. Bruce, D.M. 2003. Mathematical modeling of the cellular mechanics of plants. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 358: 1437-1444.
5. Carbonneau, A., A. Deloire, and B. Jaillard. 2007. *La Vigne. Physiologie, terroir culture.* Dunod, Paris.
6. Costantini, L., J. Battilana, F. Lamaj, G. Fanizza, and M.S. Grando. 2008. Berry and phenology-related traits in grapevine (*Vitis vinifera L.*): From Quantitative Trait Loci to underlying genes. *BMC Plant Biol.* 8:38-55.
7. Coombe, B.G., and P.E. Phillips. 1982. Development of the grape berry. III. Compositional changes during veraison measured by sequential hypodermic sampling. *In Proceedings of the UCD Grape and Wine Centennial Symposium* (ed.), pp 132-136. University of California, Davis.
8. Coombe, B.G., and M.G. McCarthy. 2000. Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Aust. J. Grape and Wine Res* 6(2): 131-135.
9. Ebadi A., P. May, M. Sedgley, and B.G. Coombe. 1995. Effect of low temperature near flowering time on ovule development and pollen tube growth in the grapevine (*Vitis vinifera L.*), cvs Chardonnay and Shiraz. *Aust. J. Grape Wine Res.* 1: 11-18.
10. Ebadi, A., J. Erfani Moghadam, and R. Fatahi. 2009. Evolution of 22 population achieved from controlled crossing between some seeded x seedless grapevines cultivars. *Sci. Hortic.* 119: 371-376.
11. Ewart A., and W.M. Kliewer. 1977. Effects of controlled day and night temperatures and nitrogen on fruit set, ovule fertility and fruit composition of several wine grape cultivars. *Am. J.Enol. Vitic.* 28(2): 88-95.
12. Fournand, D., A. Vincens, L. Sidhoum, J.M. Souquet, M. Moutounet, and V. Cheynier. 2006. Accumulation and extractability of grape skin tannins and anthocyanins at different advanced physiological stages. *J. Agri. Food Chem.* 54: 7331-7338.
13. Greenspan, M.D., H.R. Schultz, and Matthews, M.A. 1996. Field evaluation of water transport in grape berries during water deficits. *Physiol. Plant.* 97: 55-62.

14. Houet, C. 2011. Caractérisation de la variation phénotypique de la taille de la baie chez la vigne *Vitis vinifera* L. et approches de génétique d'association et de recherche de traces de sélection pour ce caractère. Thesis. Université d'Évry-Val d'Essonne.
15. Jullien, A., E. Malezieux, N. Michaux-Ferriere, M. Chillet, and B. Ney. 2001. Within-bunch variability in banana fruit weight: Importance of developmental lag between fruits. *Ann. Bot-London* 87: 101-108.
16. Keller M., J.P. Smith, and B.R. Bondada. 2006. Ripening grape berries remain hydraulically connected to the shoot. *J. Exp. Bot.* 57: 2577-2587.
17. Kontoudakis, N., M. Esteruelas, F. Fort, J.M. Canals, V. De Freitas, and F. Zamora. 2011. Influence of the heterogeneity of grape phenolic maturity on wine composition and quality. *Food Chem.* 124: 767-774.
18. Letaief, H., L. Rolle, and V. Gerbi. 2008. Mechanical behavior of wine grapes under compression tests. *Am. J. Vitic. Enol.* 59: 323-329.
19. Matthews M.A., T.R. Thomas, and K.A. Shackel. 2009. Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: Possible relation of veraison to turgor and berry softening. *Aust. J Grape Wine Res.* 15(3): 278-283.
20. Maury, C., E. Madieta, M. Le Moigne, E. Mehinagic, R. Siret, and F. Jourjon. 2009. Development of a mechanical texture test to evaluate the ripening process of Cabernet Franc. *J. texture Stud.* 40: 511-535.
21. Mayor, L., R. Moreira, F. Chenlo, and A.M. Sereno. 2006. Kinetics of osmotic dehydration of pumpkin with sodium chloride solutions. *J Food Eng.* 74(2): 253-262.
22. Ojeda, H., A. Deloire, A. Carbonneau, A. Ageorges, and C. Romieu. 1999. Berry development of grapevines: relations between the growth of berries and their DNA content indicate cell multiplication and enlargement. *Vitis* 38: 145-150.
23. Ollat, N., P. Diakou-Verdin, J.P. Carde, F. Barrieu, J. P. Gaudillere, and A. Moing. 2002. Grape berry development: a review. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 36(3): 109-131.
24. Rio Segade, S., S. Giacosa, V. Gerbi, and L. Rolle. 2011a. Berry skin thickness as Main texture parameter to predict anthocyanin extractibility in Winegrape. *LWT-Food Sci. Technol.* 44: 392-398.
25. Roby, G. and M.A. Matthews. 2004. Relative proportions of seed, skin and flesh, in ripe berries from Cabernet Sauvignon grapevines grown in a vineyard either well irrigated or under water deficit. *Aust. J. Grape Wine Res.* 10: 74-82.
26. Rogiers, S.Y., J.M. Hatfield, V. Gunta Jaudzems, R.G. White, and M. Keller. 2004. Grape berry cv Shiraz epicuticular wax and transpiration during ripening and preharvest weight loss. *Am. J. Enol. Vitic.* 55: 121-127.

27. Rojas, A.M., M.A. Castro, S.M. Alzamora, and L.N. Gerschenson. 2001. Turgor Pressure Effects on Textural Behavior of Honeydew Melon. *JFS: Food Eng. Phys Prop* 66(1): 11-117.
28. Rolle, L., S. Giacosa, V. Gerbi, and V. Novello. 2011b. Comparative study of texture properties, color characteristics, and chemical composition of ten white table-grape varieties. *Am. J. Enol. Vitic.* 62: 49-56.
29. Rolle, L., R. Siret, S. Río Segade, C. Maury, V. Gerbi, and F. Jourjon. 2012. Instrumental texture analysis parameters as markers of table-grape and wine grape quality: A review. *Am. J. Enol. Vitic.* 63: 11-28.
30. Sajná, C., G. Gamba, L.N. Gerschenson, and A.M. Rojas. 2003. Textural, histological and biochemical changes in cucumber (*Cucumis sativus* L.) due to immersion and variation in turgor pressure. *J. Sci. Food Agr.* 83:731-740.
31. Saladié, M., A.J. Matas, T. Isaacson, and M.A. Jenks. 2007. A Reevaluation of the Key Factors That Influence Tomato Fruit Softening and Integrity. *Plant Physiol* 144: 1012-1028.
32. Thomas, R.T., K.A. Shackel, and M.A. Matthews. 2008. Mesocarp cell turgor in *Vitis vinifera* L. berries throughout development and its relation to firmness, growth, and the onset of ripening. *Planta* 228: 1067-1076.
33. Torchio, F., E. Cagnasso, V. Gerbi, and L. Rolle. 2010. Mechanical properties, phenolic composition and extractability indices of Barbera grapes of different solids contents from several growing areas. *Anal. Chim. Acta* 660: 183-189.
34. Vicens, A., D. Fournand, P. Williams, L. Sidhoum, M. Moutounet and, T. Doco. 2009. Changes in Polysaccharide and Protein Composition of Cell Walls in Grape Berry Skin (Cv. Shiraz) during Ripening and Over-Ripening. *J. Agric. Food Chem.* 57 (7): 2955-2960.
35. Zouid, I., R. Siret, E. Mehinagic, C. Maury, M. Chevalier, and F. Jourjon. 2010. Evolution of grape berries during ripening: Investigations into the links between their mechanical properties and the extractability of their skin anthocyanins. *J. Int. Sci.Vigne Vin* 44:87-90.

**STUDY AND COMPARISON OF CHANGES IN MECHANICAL PROPERTIES OF GRAPES FROM THE CABERNET FRANC AND CHENIN (*Vitis vinifera* L.) DURING MATURATION.**



Stéphanie Doumouya<sup>1</sup>, R. Siret<sup>1</sup>, R. Symoneaux<sup>1</sup>, F. Jourjon<sup>1</sup>, E. Mehinagic<sup>1</sup>, M. Lahaye<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UMT VINITERA, Unité de recherche GRAPPE – ESA - Angers, France

<sup>2</sup> Unité BIA-INRA Nantes, France

Contact : s.doumouya@groupe-esa.com



**Introduction**

The hypothesis of a link between changes in extractability of phenolic compounds and mechanical properties of berries, perceived through the general term "texture" can be advanced (Le Moigne et al., 2008, and Maury et al., 2009; Zouid et al., 2010). Indeed, these studies have demonstrated particular interest to understand the textural quality of the grapes through the study of the variation of mechanical properties of the berries from the Cabernet Franc during maturation. However, little data or works are referenced in the literature concerning the analysis of these properties and their evolution for white grapes varieties .

**Materials and methods**

**•Sampling**

-Berries of Cabernet Franc and Chenin from the Loire Valley (France).

-Weekly collection on dates during maturation (vintage 2010).

-Two parcels of Cabernet Franc coded 2 and 3.

-Four parcels of Chenin coded 10, 11, 19 and 36.

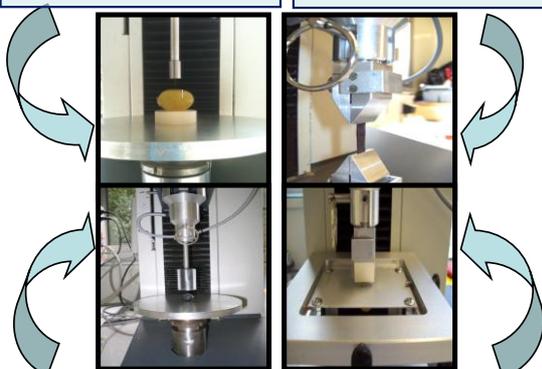
**•Physical measurements**

**Penetrometry**

- 30 berries per date in the equatorial position
- Speed of 8 mm / min to a depth of 2mm

**Skin traction**

- 30 skins of berries per date
- Speed of 8 mm / min



**Compression**

- 30 berries per date in the equatorial position
- 20% ou 70% deformation with a speed of 50mm.min<sup>-1</sup>

**Pedicel traction**

- 30 berries per date
- Speed 8mm.min<sup>-1</sup>

**Results and discussion**

❖ **Table 1. Analysis of variance (ANOVA) for textural parameters as a fonction of maturity and origin for the two varieties (Cabernet Franc and Chenin). Significant with probability p < 0.001, significant with probability = p < 0.01, significant with probability p = < 0.05 150**

Technique	Paramètres	Cabernet Franc						Chenin					
		Date	Parcelle	Date*Parcelle	F-ratio	p	Date	Parcelle	Date*Parcelle	F-ratio	p		
Penetrometry	Fmax	5.18	<0.01	17.04	<0.01	<0.01	8.01	ns	17.37	<0.01	<0.01		
	Almax	14.13	<0.01	4.4	<0.05	<0.01	0.99	ns	4.36	<0.01	<0.01		
	W	13.97	<0.01	13.52	<0.01	<0.01	0.02	ns	13.06	<0.01	<0.01		
Skin traction	Fmax	4.44	<0.01	4.82	<0.05	<0.05	0.48	ns	14.25	<0.01	<0.01		
	Almax	9.88	<0.01	2.54	ns	ns	2.99	ns	36.6	<0.01	<0.01		
	W	2.51	ns	7.74	<0.01	ns	0.06	ns	59.23	<0.01	<0.01		
Double compression 20%	F1	2.24	ns	0.25	ns	ns	2.24	ns	0.25	ns	ns		
	F2	2.87	<0.05	0.4	ns	ns	2.87	<0.05	0.4	ns	ns		
	Grad0	3.54	<0.05	3.11	ns	<0.05	3.54	<0.05	3.11	ns	ns		
	Grad1	0.94	ns	1.02	ns	ns	0.94	ns	1.02	ns	ns		
	Grad2	0.07	ns	2.39	ns	ns	0.007	ns	2.39	ns	ns		
	W1	0.83	ns	0.15	ns	ns	0.83	ns	0.15	ns	ns		
Compression 70%	W2	1.28	ns	4.54	<0.05	ns	1.28	ns	4.54	<0.05	<0.05		
	Collédon	0.36	ns	14.79	<0.01	<0.05	0.36	ns	14.79	<0.01	<0.01		
	Gommeux	2.01	ns	10.01	<0.01	<0.05	2.01	ns	10.01	<0.01	<0.01		
Pedicel traction	Fmax	1.26	ns	1.02	ns	ns	10.24	<0.01	13.42	<0.01	<0.01		
	W	0.11	ns	8.02	<0.01	ns	11.74	<0.01	11.78	<0.01	<0.01		

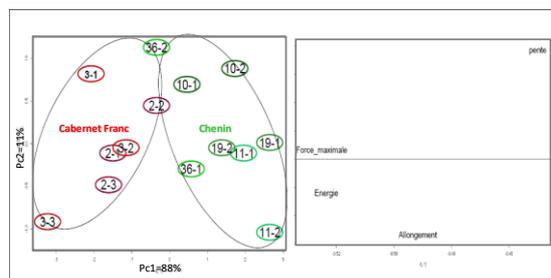
Penetrometry, skin traction and compression 70% seem to be efficace to make differences between the dates and between the origins.

❖ **Table 2. Comparison texture data (mean values Fmax) between Cabernet Franc and Chenin (ns = not significant).**

		Skin traction	Pedicel traction	Compression 20%	Compression 70%	Penetrometry
Mean value Fmax (N)	Cabernet Franc	2.04	1.49	2.62	5.96	0.31
	Chenin	1.20	1.46	2.40	8.00	0.23
	Significativity	<0.001	NS	<0.05	<0.001	<0.001

The results of Fmax values extracted from measurements of penetrometry and skin traction show that the grapes of Cabernet Franc have more resistant skins than those from the Chenin.

❖ **Table 3. Results of principal component analysis (PCA) for penetrometry. The first number corresponds to the parcel number and the second the sampling date.**



**Conclusion**

This study could demonstrate that the mechanical properties of red and white varieties were significantly different. Skins of Cabernet Franc are more resistant than those of Chenin. We can suppose that the differences in results between the red and white varieties can illustrate the increased sensitivity of grapes from white grapes to fungal attack compared to those from red grapes. Perspectives of this work will subsequently understand the origin of these developments and continue with the identification on a microscopic scale (cell walls and grapes) of phenomena responsible for the variation of mechanical properties during maturation.

Maury C. et al., 2009, "Development of a mechanical texture test to evaluate the ripening process of Cabernet Franc.", Journal of texture studies, 40, 511-535.

Macrowine Juin 2012, Bordeaux

# Physical And Physiological Heterogeneity Within Grape Bunch: Impact On Mechanical Properties



<sup>1</sup>S. Doumouya<sup>1</sup>, R. Siret<sup>1</sup>, C. Maury<sup>1</sup>, M. Lahaye<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>L'UNAM, UMT VINITERA, UPSP GRAPPE – ESA - Angers, France; <sup>2</sup> Unité BIA-INRA Nantes, France  
 Contact : s.doumouya@groupe-esa.com

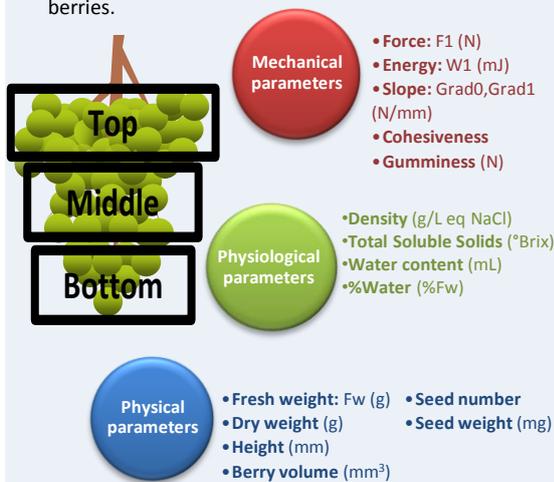


## Introduction

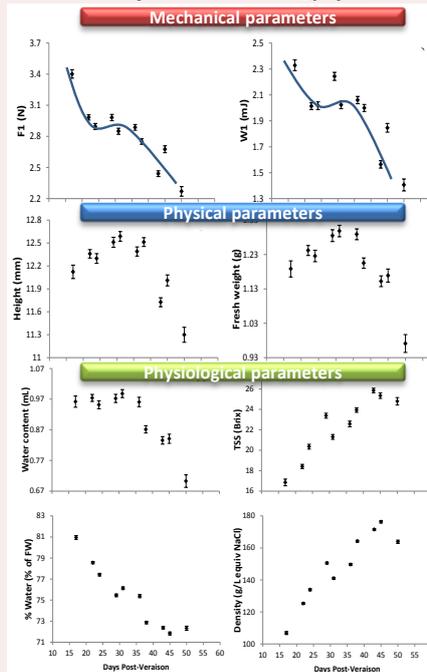
Grape quality is multi-criteria, which classical evaluations use principally destructive methods. New methods are desired for estimating grape quality directly in the vineyard and preserving the production. This study further assessed berries textural measurements in the objective of proposing them as a new indicator of the maturity of grapes. To achieve this aim, an appraisal of the within-grape heterogeneity and the ripening related changes was realized using double compression tests on whole grape bunches berries of Cabernet Franc in relation with their physical and physiological parameters.

## Materials and methods

Grape bunches of Cabernet Franc were collected in 2011 twice a week during 6 weeks from veraison to harvest time. For each date, each berry was classified according to its position in the bunch into one of three equal classes: "Top", "Middle" and "Bottom" each representing one third of the total berries.



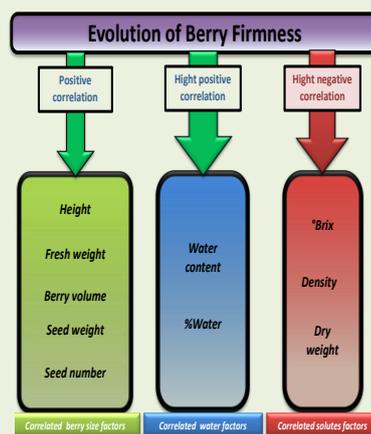
## 1-Evolution of main mechanical, physical and physiological parameters during maturation



Parameters related to berry firmness, F1 and W1, followed a sigmoid-like decrease. A high water loss at mid-maturation was concomitant with their decreased firmness (F1 and W1) in support of a major role of water on texture. These results show that whole grape bunches sampling allowed to see significant changes in berry texture during maturation even between close dates, with an evolution of physical and physiological parameters in agreement with the literature.

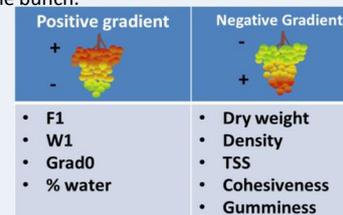
## 2-Correlations between physical, physiological and mechanical data

The correlation coefficients of all mean parameters throughout ripening were studied in order to estimate which parameters are linked to the evolution of berry texture during maturation. Results showed positive correlations between firmness and berry size as well as water-related factors while high negative relationships were observed between firmness and total soluble solids, density and dry weight. Altogether, these results suggest that within a harvest, softer berries are sweeter and smaller in size and weight.



## 3-Characterization of the variability of physical, physiological and texture parameters within the ripening bunch

The mean values of each physical, mechanical and physiological measurement according to the position of the berry on the bunch showed to different patterns. The first one was a positive gradient with increasing values from bottom to top of the bunch. The second one was a negative gradient with decreasing values from bottom to top of the bunch.



## Conclusion

This study supports the high value of texture as a quality criterion for grape maturity in revealing several correlations between berries mechanical features and key physical and physiological characteristics for grape quality assessment. This work mapped the mechanical properties heterogeneity within a grape bunch during maturation and allowed proposing new sampling strategies to improve the use of this test in the vineyard taking into account this heterogeneity.

In Vino Analytica Scientia, 2-5 July 2013 Reims, France



Compréhension des facteurs physiques et physiologiques impliqués dans les changements de propriétés mécaniques de la baie de raisin au cours de la maturation : impact de l'hétérogénéité de la matière première.

La qualité d'un vin est étroitement liée à la qualité sa matière première la baie de raisin. Il est donc nécessaire pour la filière d'avoir à disposition des outils fiables de prédiction de la qualité, permettant un choix de date de vendange optimal ainsi qu'un choix d'itinéraires œnologiques adaptés. L'évaluation de la qualité est basée sur des indicateurs permettant une approche multicritères, parmi lesquels émergent les propriétés mécaniques des baies regroupées sous le terme de « texture ». Cet indicateur, permet entre autres, d'évaluer l'assouplissement et le ramollissement des baies de raisin au cours de la maturation. Des travaux précédents ont permis d'appréhender la qualité texturale du raisin par une approche sensorielle (Le Moigne, 2008) et instrumentale (Zouid, 2011) en établissant un lien entre la résistance et l'élasticité des pellicules et la diffusion des composés phénoliques au cours du processus de vinification. Bien qu'encourageante, la notion de maturité texturale n'est pas encore intégrée de manière systématique comme paramètre de suivi de la qualité et de la maturation raisins. Certains verrous techniques et scientifiques subsistent notamment sur le fait qu'il était difficile par une approche instrumentale de différencier des stades de maturité texturale différents. Les mesures étant réalisées par une approche baie à baie, il était primordial de connaître l'impact de l'hétérogénéité des raisins sur les mesures de texture. Dans ce contexte, ce travail de thèse aborde la notion de maturité texturale en lien avec l'évolution de paramètres physiques et physiologiques au cours de la maturation, le but étant de comprendre l'impact de l'hétérogénéité sur les propriétés mécaniques et d'en adapter les protocoles d'échantillonnages. Premièrement, la comparaison de deux variétés de raisins de cuve Blanc et Rouge par cinq méthodes instrumentales de mesure de la texture, a permis de valider le Cabernet Franc et la technique de double compression 20% comme étant respectivement le matériel végétal et la technique de mesure instrumentale de référence pour notre étude. Deuxièmement, l'évolution au cours de la maturation des paramètres de double compression et des principaux facteurs physiologiques et physiques des baies a été étudiée suivant un protocole d'échantillonnage par grappe entières. Ces résultats ont notamment fait ressortir le rôle prépondérant des paramètres physiologiques liés à l'eau, dans l'évolution des propriétés mécaniques du raisin. De plus, il est montré que l'impact de la position et de l'exposition des baies sur la grappe est un facteur significatif d'hétérogénéité textural. Les résultats de ce travail apportent des informations clés sur l'évolution de la texture des baies au cours de la maturation. Ils ont également démontré l'importance de considérer l'hétérogénéité intra grappe sur les mesures de texture et proposent un nouveau mode d'échantillonnage à la parcelle à la fois représentatif et comparable d'une date à l'autre permettant un suivi fiable de la maturité texturale.

**Mots clés:** Propriétés mécaniques, Cabernet Franc, hétérogénéité, échantillonnage.

Understanding of the physical and physiological factors involved in the changes of mechanical properties of the grape berry during ripening: impact of the heterogeneity of the raw material.

The wine quality is closely related to the quality of grapes. It is therefore necessary for the viticulturist to have reliable indicators for predicting the quality, allowing a choice of optimum harvest date and a choice of routes for wine. The quality assessment is based on multiple criteria indicators, including emerging mechanical properties of berries grouped under the term " texture ". This indicator allows to evaluate the relaxation and softening of grape berries during ripening. Previous work has helped to understand the textural quality of the grapes by sensory approach (Le Moigne, 2008) and instrumental approach (Zouid, 2011) by establishing a link between the resistance and elasticity of the berry skin and the diffusion of phenolic compounds during the winemaking process. Although promising, the concept of textural maturity is not yet systematically integrated as a parameter for monitoring the quality and ripening grapes. Some technical and scientific limitations remain including the fact that it was difficult for an instrumental approach to differentiate different textural maturity stages. Measurements were taken by a berry per berry approach, so it is important to know the impact of the heterogeneity of grapes on texture measurements. In this context, this thesis discusses the concept of textural maturity in connection with the development of physical and physiological parameters during ripening, in order to understand the impact of heterogeneity on the mechanical properties and adapt the sampling protocols. First, the comparison of two varieties of wine grapes white and red by five instrumental methods of texture measurement was used to validate the Cabernet Franc and the technique of double compression 20% respectively as plant material and instrumental technique of reference for our study. Secondly, changes during ripening of double compression's parameters and key physical and physiological parameters of berries has been studied according to a protocol by sampling whole grape bunches. These results have highlighted the important role of physiological parameters related to water in the evolution of the mechanical properties of the grape. Furthermore, it is shown that the impact of the position and exposure of berries on the cluster is a significant factor textural heterogeneity. The results of this work provide key information on the evolution of the texture of berries during ripening. They also demonstrated the importance of considering the heterogeneity of intra-cluster measures and propose a new texture sampling mode to plot both representative and comparable from one date to another for reliable monitoring textural maturity.

**Key words:** Mechanical properties, Cabernet Franc, heterogeneity, sampling.