J. Int. Sci. Vigne Vin, 1997, **31**, n°3, 127-138

FERMETÉ ET MATURATION DU RAISIN. DÉFINITION ET ÉVOLUTION DE DIFFÉRENTS PARAMÈTRES RHÉOLOGIQUES AU COURS DE LA MATURATION

FIRMNESS AND GRAPE BERRY MATURATION. DEFINITION OF DIFFERENT RHEOLOGICAL PARAMETERS DURING THE RIPENING

J.P. ROBIN*, P. ABBAL* et J.M. SALMON**

*Unité de Recherche de Biochimie Métabolique et Technologie, IPV-INRA, Institut Supérieur de la Vigne et du Vin, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex (France)
**Unité de Microbiologie et Technologie des Fermentations, IPV-INRA, Institut Supérieur de la Vigne et du Vin, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex (France)

Résumé : Les caractéristiques mécaniques des baies de Syrah et de Gamay ont été étudiées au cours de leur maturation, à l'aide du rhéomètre Pénélaup™. L'analyse des contraintes enregistrées au cours de leur écrasement permet de définir différents paramètres rhéologiques et de caractériser le comportement mécanique du raisin et son évolution. En particulier, des paramètres qui expriment l'intensité et le sens de la courbure des courbes de déformation sont considérés comme reflètant la turgescence des baies, propriété qui est dépendante du cépage, du millésime et des conditions environnementales.

Abstract : Mechanical properties of Shiraz and Gamay grape berries were studied in relation with their maturity state using the Penelaup™ rheometer. The analysis of the constrains registered during berry crushing with the flat tool of the device, up to the pellicular tearing, allowed the definition of different rheological parameters and the characterisation of mechanical behaviour of grape and its evolution with the degree of ripening. The analysis of the deformability curves shows, independently of the cultivar, that berry behaviour is not elastical except for some berries at the beginning and at the end of the ripening. This behaviour can be characterised by two indexes expressing the curvature sense of deformability curves, the curvature degree in a way reflecting the turgescence state of the grape. Berry firmness was also considered in two different ways : the initial firmness which represents the elasticity coefficient of the fruit at the beginning of the deformation, and the bursting firmness wich can be considered as the pellicular elasticity ceofficient. Others parameters, as the pellicular strength which can be expressed from the value of the displacement at berry bursting and the energy used for the deformation were also defined. The evolution of these different parameters during ripening confirms that berry softening at the véraison time depends on the cultivar and on environmental conditions as the vintage. The analysis of the evolutions also indicates that pellicular strength is maximum at this crucial period of berry development.

Mots clés : *Vitis vinifera*, baie de raisin, fruit, maturation, véraison, rhéologie, fermeté

Key words : *Vitis vinifera*, grape berry, fruit, ripening, grape inception, rheology, firmness

INTRODUCTION

La résistance mécanique ou la fermeté d'un fruit est considérée comme un paramètre important de caractérisation de son état de maturité ou de conservation, au même titre que son taux de sucres ou sa couleur. La mesure objective de ce paramètre physique est souvent indispensable, notamment aux plans économique et technologique, pour décider de la destination d'une production fruitière donnée. Parmi les méthodes susceptibles de rendre compte des caractéristiques mécaniques des fruits, les méthodes reposant sur la pénétrométrie sont les plus fréquemment utilisées. Les tests mettent généralement en œuvre un dispositif permettant la compression destructrice ou non, ou la pénétration du fruit, la fermeté étant calculée à partir de la contrainte ou du déplacement enregistré. Les divers rhéomètres ou pénétromètres utilisés ont permis par exemple, la caractérisation de la fermeté du kiwi au cours de sa conservation (NICOLAS *et al.*, 1987), celle de diverses variétés d'abricots (SOUTY *et al.*, 1991), ou encore celles de tomates, de cerises et de pommes (DUPRAT *et al.*, 1995). En ce qui concerne le raisin, un nombre limité d'études prennent en compte les propriétés mécaniques de la baie et leur modifications en fonction de la maturation ou des conditions environnementales. On peut cependant citer les travaux réa-

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

lisés par COMBE et BISHOP (1980) sur le développement de la baie de raisin ou encore ceux de CREASY et LOMBARD (1993) sur l'influence du statut hydrique de la plante sur la déformabilité des baies de Pinot noir. Il est bien connu qu'en viticulture, la résistance mécanique des baies peut influer sur l'intégrité et la qualité sanitaire de la vendange. En technologie, notamment dans les procédés de vinification mettant en œuvre une phase de macération de baies entières (vinification par macération carbonique, vinification beaujolaise), il est aussi admis que les caractéristiques mécaniques des baies constituent un facteur pouvant influer de façon sensible sur la vinification et la qualité du vin, notamment en modifiant la proportion de jus de goutte en fond de cuve. Ainsi, apparaît-il, aux différents plans précités, qu'il y a nécessité de disposer d'un système de mesure fiable et pertinent des caractéristiques mécaniques du raisin.

Les résultats présentés dans cet article concrétisent l'aboutissement des recherches menées depuis 1990 sur le développement du pénétromètre Pénélaup appliqué à l'analyse rhéologique des baies de raisin. Les tests sont ici réalisés de façon destructrice, par compression, ou écrasement, jusqu'à la rupture pelliculaire. L'analyse complète des données enregistrées par l'appareil permet de préciser la notion de fermeté déjà utilisée pour ce fruit (ABBAL et PLANTON, 1990 ; ABBAL *et al.*, 1992 ; ROBIN *et al.*, 1996a) et de définir un certain nombre d'autres paramètres rhéologiques indépendants du diamètre et caractérisant le comportement rhéologique d'une baie de raisin individuelle ou celui, moyen, d'une population donnée. Bien que la signification de ces paramètres en termes de composition ou de structure tissulaire ne soit pas clairement établie, la prise en compte de ce type de caractéristique physique devrait aider à la discrimination des divers effets rencontrés dans la filière viti-œnologique (effets liés au cépage, au millésime, au terroir, aux conditions de culture...), et être ainsi utiles tant au niveau de la recherche qu'au niveau de la pratique.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

I — MATÉRIEL D'ÉTUDE

Cinq grappes des cépages Syrah et Gamay ont été prélevées au hasard durant les campagnes 1991 à 1996, sur des parcelles du vignoble de la Station Expérimentale de l'INRA à Pech-Rouge, près de Narbonne, France. Ces grappes sont prélevées depuis le stade dit « grappe fermée » d'après BAILLOD et BAGGIOLINI (1993), jusqu'au stade de la maturité technologique. Des échantillons homogènes de baies sont constitués selon le protocole préconisé par FLANZY *et al.* (1969), les baies étant dissociées de la grappe par ciselage au niveau du bourrelet. Les échantillons sont lavés à l'eau du robinet, triés (les baies anormales, blessées ou pourries sont éliminées du lot) puis épongés sur Kleenex ; seules les baies d'un diamètre supérieur ou égal à 4 mm sont retenues.

II — MÉTHODE

1°) Méthode de mesure

Les mesures sont réalisées à l'aide du rhéomètre Pénélaup™ (figure 1), appareil qui enregistre la résistance des baies à l'écrasement (ABBAL et PLANTON, 1991). Dans l'étude qui est rapportée, l'appareil a été programmé pour diminuer le diamètre de la baie de 40 p. cent de son diamètre initial (ou de 50 p. cent dans le cas du Gamay, en 1991), avec une vitesse d'écrasement de 1 mm/s. Ces amplitudes de déformation sont en général suffisantes pour provoquer l'éclatement de la plupart des baies. L'appareil enregistre, au départ de la mesure, la masse et le diamètre de la baie. 10 mesures de contrainte, allant de 10 à 100 p. cent des 40 p. cent du diamètre (ces mesures correspondent donc à 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 et 40 p. cent du diamètre, lorsque le déplacement maximum a été fixé à 40 p. cent) ainsi que la mesure de la contrainte maximum au moment de l'éclatement de la baie, avec le pourcentage de déformation correspondant, sont enregistrées tout au long de la déformation (figure 2). Des résultats préliminaires indiquent qu'un nombre voisin de 100 baies est suffisant pour caractériser le comportement rhéologique d'une population de baies. 100 baies sont donc prises au hasard dans chaque échantillon et écrasées à l'aide de l'appareil.

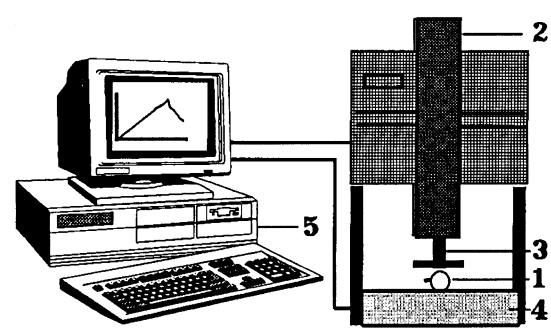


Fig. 1 — Le rhéomètre Pénélaup™

1 : baie de raisin. 2 : colonne et système de déplacement à vis sans fin asservie et vitesse variable de 0,5 à 3 mm/s. 3 : mandrin et outil d'écrasement plat. 4 : balance de précision. 5 : microordinateur.

Fig. 1 — The Pénélaup™ rheometer

1 : grape berry. 2 : column and moving system with endless slaved screw. Tool speed varies between 0.5 and 3 mm/s. 3 : chuck and flat crushing tool. 4 : precision balance. 5 : computer.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

2°) Expressions et représentations des résultats

La contrainte F est exprimée en g force (gf). La fermeté de la baie a jusqu'à présent été considérée comme le rapport entre la contrainte F et le déplacement X (mm) correspondant (ROBIN *et al.*, 1996 a) ; elle est donc exprimée en gf/mm. Les paramètres qui seront définis pour caractériser la forme des courbes de déformation seront exprimés en gf/mm ou en gf.mm. Les énergies dépensées pour la déformation seront exprimées en milli Joule (1 gf.mm = $9{,}81.10^{-6}$ J).

Si les paramètres simples sont directement accessibles à partir des fichiers de données (figure 2), le calcul des paramètres indicatifs de la forme des courbes ou de l'énergie dépensée a requis l'utilisation de macroprogrammes de calcul élaborés avec le logiciel Sigma Plot Windows.

n°	Fmax	Masse	Diamètre	F10	F20	F30					F100	Xmax	
61	1.3	11.90	63	182	193	272	358	452	515	293	403	508	3.3
546													
62	1.2	11.60	41	77	126	178	233	284	363	204	246	275	3.5
402													
63	2.1	14.10	69	138	231	330	444	568	726	909	524	588	4.6
932													
64	1.2	11.35	42	85	138	194	254	322	408	525	308	405	3.9
587													
65	1.8	13.35	60	116	186	254	333	415	529	566	407	461	4.2
644													
66	0.6	9.85	61	131	225	331	446	579	735	907	395	563	3.3
942													
67	1.3	12.10	66	122	193	272	359	455	577	732	942	654	4.7
1055													
68	1.0	11.10	54	109	175	243	320	402	401	355	311	322	2.9
444													
69	1.3	11.85	36	73	118	176	245	331	423	542	705	594	4.5
784													
70	1.5	12.60	49	103	167	241	315	397	486	589	579	556	4.3
631													
71	2.2	14.35	58	129	218	314	414	524	657	792	578	627	4.6
796													

Fig. 2 — Exemple de listing de données brutes sortant sur l'imprimante associée au microordinateur du Pénélaup™

Fig. 2 — Raw data listing output from the Pénélaup™ computer

Deux types de représentation des résultats sont donnés dans les figures. Le premier correspond à des représentations sous forme de nuages de points, chaque point correspondant à une baie individuelle. Ce mode de représentation est utile pour rendre compte des relations existant entre les paramètres pour l'ensemble des baies correspondant à une situation donnée. La représentation résultante visualise directement la dispersion de la valeur des paramètres en fonction de l'avancement de la maturation (sens de la flèche indiquée sur la figure). Le second type rapporte, en fonction de la date ou du stade de maturité (en nombre de semaines, le stade correspondant à la maturité technologique étant défini comme le stade zéro), les évolutions des valeurs moyennes des paramètres. Dans ce cas, les valeurs portées sur les graphiques correspondent à la moyenne d'un minimum de 100 valeurs individuelles du paramètre pour l'échantillon examiné. Cette valeur moyenne et l'écart-type correspondant (non systématiquement représenté sur les figures pour une question de simplicité), caractérisent le comportement de la population à l'égard du paramètre pris en compte. L'écart-type indiqué pour une valeur moyenne donnée est à considérer comme une caractéristique constitutionnelle de l'échantillon (son degré d'hétérogénéité) plutôt que comme une valeur indiquant le degré de précision de la mesure.

RÉSULTATS

I — COURBES DE DÉFORMATION

Les 10 valeurs de la contrainte enregistrées tous les 10 p. cent du déplacement maximum préalablement fixé, définissent une courbe de déformation pour une baie donnée. Les moyennes de ces valeurs pour un échantillon représentatif, permettent de définir la courbe de déformation moyenne pour l'échantillon en question. La figure 3 montre pour exemples, les courbes de déformation moyenne de baies vertes et mûres, respectivement trois semaines avant véraison et trois semaines après véraison, ces courbes étant rapportées soit au déplacement moyen exprimé en mm (figure 3 A), soit standardisées par rapport au déplacement exprimé en pourcentage du diamètre moyen des baies (figures 3 B). A l'examen général de la moitié ou des deux premiers tiers des courbes, on constate ici que la déformation dévie assez peu de la linéarité ; en première approximation, on peut donc dire que la déformation est quasiment élastique dans cette zone et pour ces catégories de baies. Au delà, la contrainte est de moins en moins élastique et il y a, avant éclatement, destruction irréversible de la structure interne de la baie.

L'appareil possédant une électronique capable d'enregistrer des variations de contraintes très brutales et rapides, une onzième valeur, celle de la contrainte maximum (notée Fmax) au moment de la déchirure de la pellicule ou de l'éclatement de la baie, est enregistrée au cours de la déformation. Le déplacement correspondant (noté Xmax) est aussi enregistré. Quel que soit le cépage et l'état de maturité, le point correspondant se situe sur ou proche de la droite de régression calculée à partir des premiers points moyens expérimentaux ou de ceux les plus alignés. Le rapport Fmax/Xmax a été, jusqu'à ce jour, considéré comme un paramètre pouvant caractériser le comportement rhéologique ou la résistance mécanique des baies de raisin, et il a été dénommé fermeté (ROBIN *et al.*, 1996a).

II — DÉFINITION DES PARAMÈTRES

La signification rhéologique précise de l'indice de fermeté Fmax/Xmax dont il vient d'être question n'est pas encore clairement définie et il apparaît que cet indice n'est pas suffisant pour différencier les caractéristiques

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

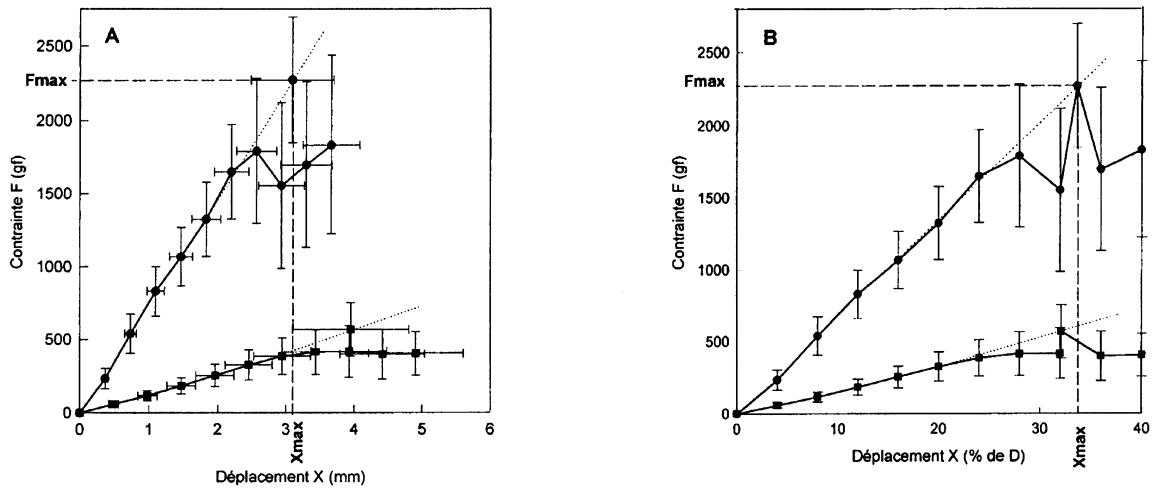


Fig. 3 — Exemples de courbes de déformation d'échantillons représentatifs de baies de Syrah.

A : en fonction du déplacement exprimé en mm. B : en fonction du déplacement exprimé en pourcentage du diamètre. ● baies vertes prélevées le 11/07/1994 ; ■ baies mûres prélevées le 22/08/1994.

Fig. 3 — Examples of deformation curves from representative samples of Shiraz berries.

A : versus the deplacement expressed in mm.

B : versus the deplacement expressed in percentage of the diameter. ● green berries preleaved the 11/04/1994 ; ■ ripe berries preleaved the 22/08/1994.

afférant d'une part, à la pellicule de la baie, d'autre part, à l'entité complexe que représente le fruit entier. Par ailleurs, les différences de réponse fines, en fonction de l'état de maturité ou en fonction des conditions environnementales, ne peuvent être prises en compte par la seule considération de cet indice. En particuler, si dans l'exemple précédent le comportement moyen des baies des deux échantillons pouvait être assimilé à un comportement de type élastique, des déviations sensibles par rapport à un tel comportement sont en général observées. Elles concernent le sens de courbure des courbes de déformation. Deux types de déviations peuvent être rencontrés (figure 4), ce qui amène à définir d'autres paramètres rhéologiques.

- La fermeté initiale de la baie, qui peut être notablement différente de la fermeté à la rupture définie précédemment, est représentée par la pente à l'origine de la courbe de déformation. Cette pente est assimilée au rapport F10/X10, F10 et X10 étant respectivement la contrainte (en gf) pour un écrasement de 10 p. cent du diamètre de la baie et le déplacement correspondant en mm (figure 4).

- La différence entre la pente à l'origine ou fermeté initiale précédente et la pente de la droite fictive de déformation élastique (Fmax/Xmax, représentant le coefficient d'élasticité) ou fermeté à la rupture, permet de caractériser la courbure de la courbe de déformation. On considère par convention que la courbure est positive lorsque la différence (Fmax/Xmax) - (F10/X10) est positive et qu'elle est négative lorsque cette différence est négative.

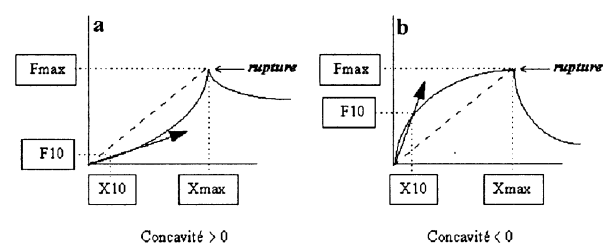


Fig. 4 — Représentations schématiques des deux principaux types de courbes de déformation

Fig. 4 — Schemes of the two main types of deformation curve

- La surface sous la courbe de déformation, jusqu'à l'éclatement de la baie ou jusqu'au déplacement maximum imposé, est utile pour calculer l'énergie dépensée pour la déformation.

- La différence entre la surface sous la courbe et la surface sous la droite fictive de déformation élastique, surfaces calculées entre zéro et la rupture pelliculaire, peut aussi être utile pour caractériser la forme des courbes de déformation. Il y a donc possibilité de caractériser la courbure des courbes de déformation par deux modes différents, le mode « delta de pente » prenant en compte la différence de pente (Fmax/Xmax) - (F10/X10) et le mode « delta de surface » précédent, les deux modes n'exprimant pas forcément un comportement identique ou équivalent, par exemple dans le cas de courbes de déformation complexes à allure sigmoïde. Pour un échantillon donné, la caractérisation de la forme des courbes, peut aussi être exprimée, quel que soit le mode retenu, par le pourcentage de baies à courbure positive ou négative.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

- Enfin, le paramètre Xmax, exprimé en p. cent du diamètre de la baie, peut être considéré comme un indice qui reflète la résistance de la pellicule. Il est évident en effet, que plus la baie aura une pellicule résistante, plus elle se déchirera à un pourcentage de déformation élevé.

III — RELATIONS ENTRE LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES

1) Relation entre F10/X10 et Fmax/Xmax

Lorsque l'on cumule sur un même graphique l'ensemble des couples de valeurs individuelles F10/X10 et Fmax/Xmax, pour toutes les baies et pour tous les prélèvements réalisés sur la période étudiée, on observe, quel que soit le cépage, que les baies se répartissent en deux nuages de points différents (figure 5) :

- un premier nuage de points très dispersés correspondant aux baies non vérées, la véraison débutant vers des valeurs de Fmax/Xmax et de F10/X10 inférieures respectivement à 600 et 400 gf/mm pour le cépage Syrah (figure 5 A) et à 500 et 300 gf/mm pour le cépage Gamay (figure 5 B) ;

- un second nuage de points beaucoup plus concentrés débutant à la véraison, vers les valeurs précédentes et s'étendant jusqu'aux très faibles valeurs des deux paramètres (50-100 gf/mm). Ce dernier nuage correspond aux baies qui ont véré et qui mûrissent de plus en plus.

On remarque globalement que les deux nuages de points se situent au dessus de la droite à 45° qui correspond au comportement élastique (Fmax/Xmax étant dans ce cas égal à F10/X10). La fermeté à la rupture Fmax/Xmax est donc en général plus élevée que la fermeté initiale F10/X10, ce qui signifie que les courbes de déformation présentent une courbure généralement positive, comme celle de la courbe schématisée en figure 4 a. Les courbures élevées sont en général obtenues pour les baies du second nuage de points, c'est-à-dire pour celles qui démarrent leur véraison ou qui sont mûres (des déviations maximum de +35 ou +40° par rapport à la droite caractérisant le comportement élastique peuvent être observées). On remarquera aussi que dans le bas de ce nuage où se retrouvent principalement les baies très mûres, il existe des baies à comportement élastique, d'autres présentant, par contre, des courbes de déformation à courbure négative (Fmax/Xmax < F10/X10). Quelques baies à courbure négative se rencontrent également dans le premier nuage pour des baies ayant déjà commencé à se ramollir avant d'avoir véré.

Au cours du développement des baies pendant la période étudiée, on peut considérer, notamment dans le cas du Gamay (figure 5 B), que la fermeté à la rupture des baies du premier nuage ne varie pas en moyenne, alors que la fermeté initiale diminue. Cette conclusion est quasiment inversée dans le cas des baies du second nuage, la fermeté à la rupture diminuant alors que la fermeté initiale reste constante.

Il est possible à partir de l'examen de la figure 5 de définir un cheminement moyen d'une baie depuis son état vert et dur, jusqu'à son état mûr ou surmûri. Ce cheminement peut aussi être visualisé par la courbe

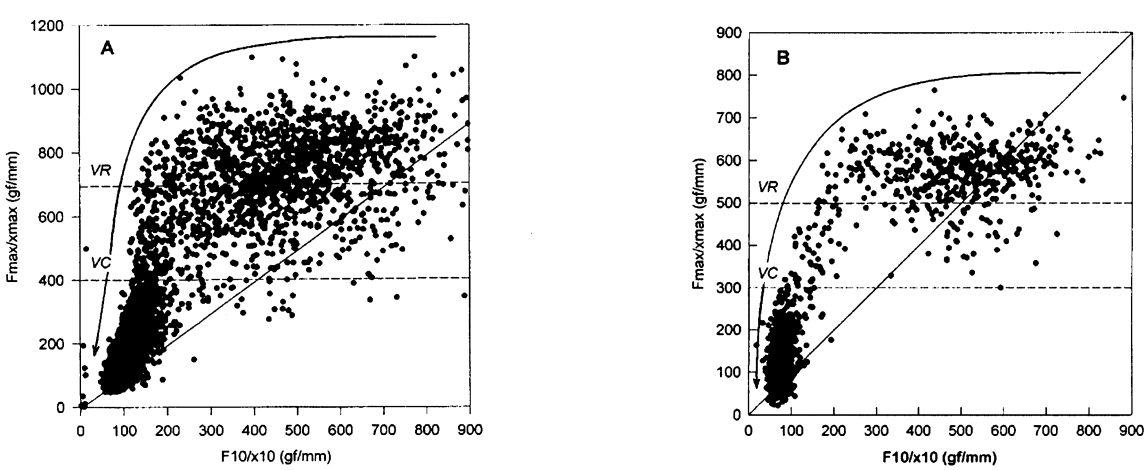


Fig. 5 — Distribution des couples de valeurs fermeté initiale (F10/X10) - fermeté à la rupture (Fmax/Xmax)

A : cumul de 40 prélèvements de baies de Syrah au cours de leur maturation en 1992.

B : cumul de 8 prélèvements de baies de Gamay au cours de leur maturation en 1991.

VR : véraison rhéologique ; *VC* : véraison classique. La flèche indique le sens du déroulement de la maturation.

Fig. 5 — Initial firmness (F10/X10) - bursting firmness (Fmax/Xmax) data couples distribution

A : accumulation of 40 samples of Chiraz berries during their ripening in 1992. B : accumulation of 8 samples of Gamay berries during their ripening in 1991.

VR : rheological veraison ; *VC* : classical veraison. The arrow indicates the sense of the ripening process.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

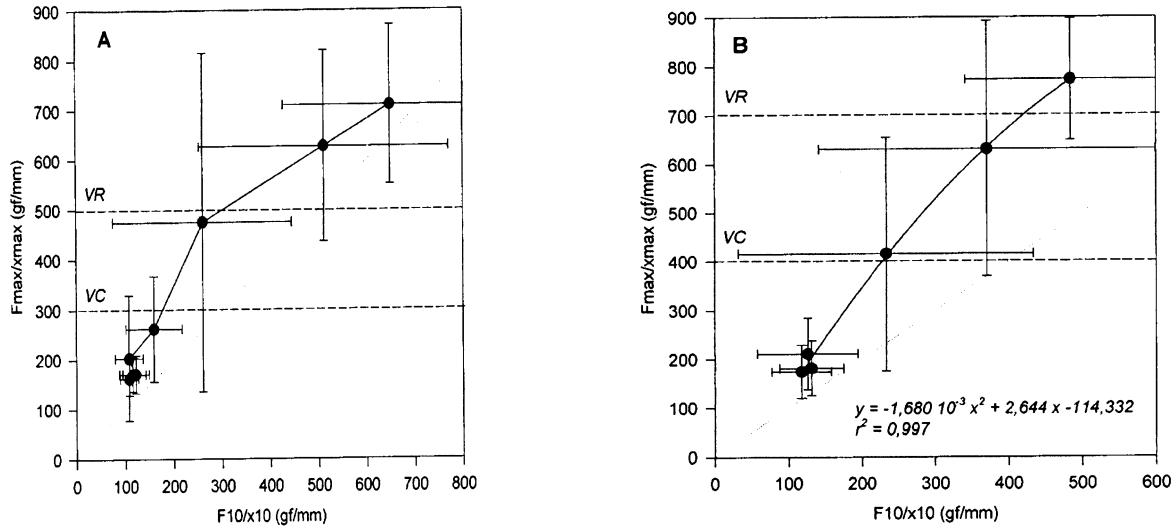


Fig. 6 — Relation entre la fermeté initiale (F10/X10) et la fermeté à la rupture (Fmax/Xmax).
A : courbe moyenne et écarts-types pour 8 prélèvements de baies de Gamay au cours de leur maturation en 1992.
B : courbe moyenne et écarts-types pour 6 prélèvements de baies de Syrah au cours de leur maturation en 1995.

Fig. 6 — Relation between the initial firmness (F10/X10) and bursting firmness (Fmax/Xmax).
A : mean curve with standard deviations for 8 samples of Gamay berries during their ripening in 1992.
B : mean curve with standard deviations for 6 samples of Chiraz berries during their ripening in 1995.

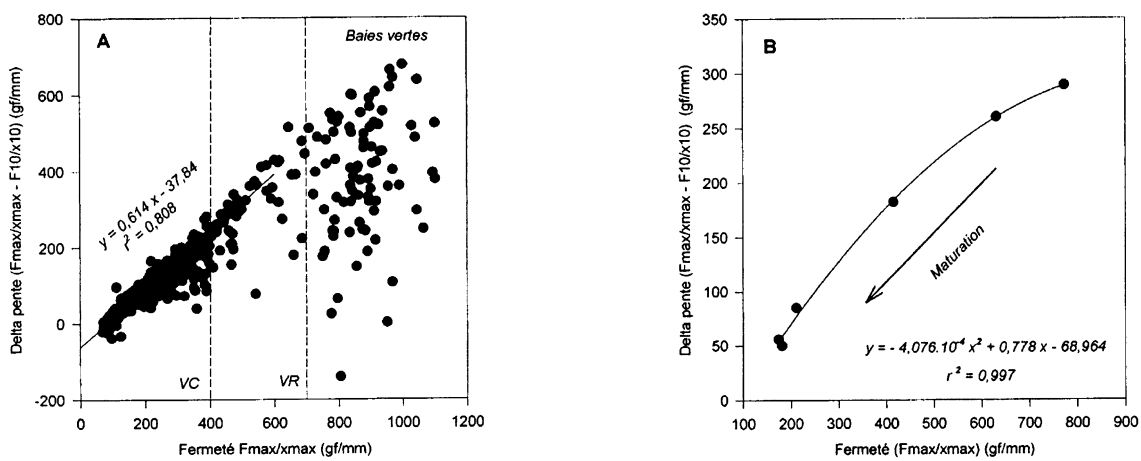


Fig. 7. — Relation entre le « delta de pente » (Fmax/Xmax - F10/X10) et la fermeté à la rupture (Fmax/Xmax)
A : distribution des couples de valeurs pour un échantillon issu de grappillons de Syrah contenant des baies vertes et plus ou moins mûres, en 1995.
B : courbe moyenne et écarts-types pour 6 prélèvements de baies de Syrah au cours de leur maturation en 1995.

Fig. 7 — Relation between the « slope difference »(Fmax/Xmax - F10/X10) and the bursting firmness (Fmax/Xmax).
A : couples data distribution for a sample issued from Chiraz grappillons containing riped and unriped berries, in 1995.
B : mean curve with standard deviations for 6 samples of Chiraz berries during their ripening in 1995.

définie à partir des couples de valeurs moyennes de Fmax/xmax et de F10/X10 (figure 6). La courbe passant par les zones de plus forte densité de points ou la courbe moyenne définie précédemment, avec les écart-types sur les points qui la composent, caractérise le comportement rhéologique des baies d'un cépage donné au cours de sa période de maturation. Elle reflète en quelque sorte l'écart de comportement par rapport à un comportement typiquement élastique, cet écart pouvant, selon la nature du cépage, suivre une loi polynomiale du second degré (figure 6 B). En plus de la courbe qui définit l'évolution d'une baie moyenne au cours de sa maturation, l'examen des écart-types apparaît essentiel pour caractériser l'aspect dispersion du comportement : on constate, pour les exemples donnés en figure 6, que ces écart-types sont nettement plus importants dans le cas des baies vertes du premier nuage, que dans le cas des baies vérées ou mûres constituant le second, l'écart-type sur Fmax/Xmax étant ici maximum au moment précis de la véraison.

L'évolution du delta de pente, Fmax/Xmax -

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

F10/X10, exprimant l'écart de comportement précédent, est illustrée par les exemples indiqués en figure 7. Dans le cas des baies vertes, ce paramètre indicatif de l'allure des courbes de déformation, n'est pas relié à la fermeté. En revanche, dans le cas des baies ayant véré, une relation de type polynomiale, proche de la linéarité, peut aussi être trouvée (figure 7 B).

2) Relation entre Fmax/Xmax et le déplacement moyen à la rupture Xmax

La relation entre la fermeté à la rupture Fmax/Xmax et le déplacement correspondant Xmax est illustrée sur la figure 8 pour les mêmes échantillons que précédemment. On distingue ici aussi deux nuages de points principaux, le premier à forte dispersion (à droite sur la figure) correspondant aux baies non vérées, le second (à gauche sur la figure) à plus faible dispersion correspondant aux baies vérées ou mûres. On peut ici aussi définir un parcours moyen des baies depuis leur état vert et dur jusqu'à leur état mûr ou surmuri. On peut ainsi constater que la valeur de Xmax passe par un maximum au moment de la véraison. La détermination précise de l'abscisse de maximum en terme de fermeté ne peut être faite car un certain nombre de baies sont mises « en butée », à la valeur 40 p. cent pour le cépage Syrah (figure 8 A) et à la valeur 50 p. cent pour le cépage Gamay (figure 8 B) ; ceci veut dire que ces baies n'ont pu éclater dans les conditions imposées au système de mesure (déplacement maximum de 40 ou 50 p. cent selon les cas). Malgré cela, si l'on admet que le paramètre Xmax est le reflet de la résistance de la pellicule, on peut dire que celle-ci évolue selon une courbe en cloche et que cette résistance est maximum au moment de la véraison.

Quel que soit le cépage, la faible fréquence observée pour les baies de la zone délimitée par les notions de véraison rhéologique (VR) et de véraison classique (VC) (ROBIN *et al.*, 1996 a, 1996 b), est indicative de la grande rapidité du mécanisme d'induction du ramollissement pour une baie individuelle (la véraison rhéologique VR correspond au début du ramollissement moyen, vers 700 gf/mm pour la Syrah, et vers 600 gf/mm pour le Gamay ; la véraison classique VC correspond au début de coloration, vers 500 gf/mm pour la Syrah et vers 300 gf/mm pour le Gamay). Les baies de cette zone correspondent à des baies encore vertes qui ont débuté leur ramollissement.

IV — ÉVOLUTIONS DES PARAMÈTRES MOYENS EN COURS DE MATURATION

1) Évolution de la fermeté à la rupture

L'évolution du paramètre Fmax/Xmax, ou fermeté à la rupture, au cours de la période de maturation, a déjà été rapportée (ROBIN *et al.*, 1996). La mesure de ce paramètre constitue une bonne appréciation du degré de ramollissement des baies en fonction de l'avancement de leur maturation. Des différences notables en fonction de la nature du cépage (figure 9) et en fonction du millésime (figure 10) sont observées. Les courbes de la figure 10 montrent en particulier, que la

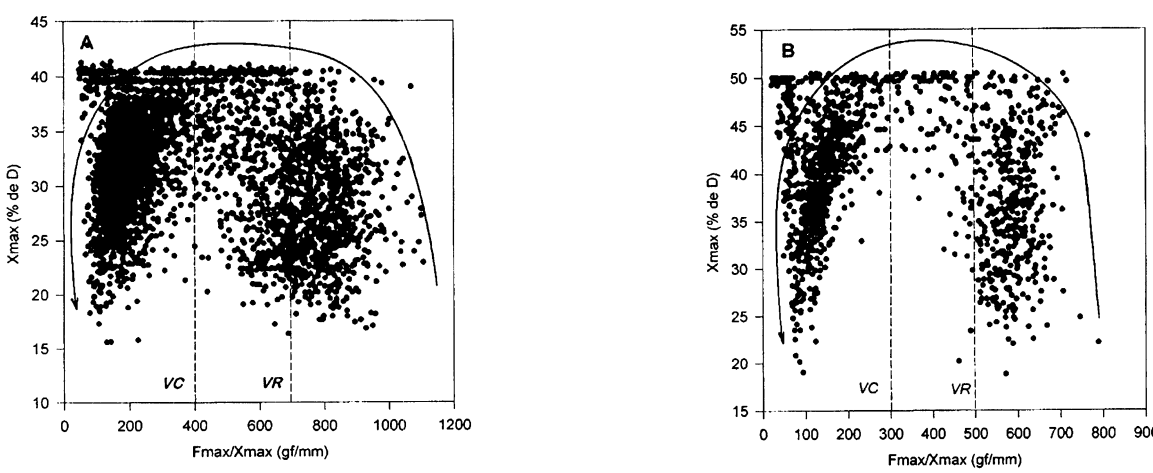


Fig. 8 — Distribution des couples de valeurs déplacement maximum à la rupture (Xmax) - fermeté à la rupture (Fmax/Xmax).

A : cumul de 40 prélèvements de baies de Syrah au cours de leur maturation en 1992.

B : cumul de 8 prélèvements de baies de Gamay au cours de leur maturation en 1991 (le réglage du déplacement maximum est ici de 50 %).

VR : véraison rhéologique ; *VC* : véraison classique. La flèche indique le sens du déroulement de la maturation.

Fig. 8 — Maximum displacement (Xmax) - bursting firmness (Fmax/Xmax) data couples distribution.

A : accumulation of 40 samples of Chiraz berries during their ripening in 1992.

B : accumulation of 8 samples of Gamay berries during their ripening in 1991(here, the maximum displacement is adjusted to 50 p. cent).

VR : rheological veraison ; *VC* : classical veraison. The arrow indicates the sense of the ripening process.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

vitesse moyenne de ramollissement d'un même cépage peut être variable d'une année sur l'autre.

2) Évolutions comparées de la fermeté à la rupture et de la fermeté initiale

Les courbes de la figure 11 permettent de voir que l'évolution de la fermeté initiale (F10/X10) n'est pas identique ou parallèle, sur toute la durée de maturation, à celle de la fermeté à la rupture Fmax/Xmax. Si, pour le Gamay (figure 11 A) les évolutions des deux paramètres sont sensiblement parallèles (sauf pour les baies très vertes), il n'en est pas de même pour la Syrah (figure 11 B).

La différence d'évolution de la fermeté initiale, par rapport à la fermeté à la rupture (que l'on peut considérer comme coefficient d'élasticité si la déformation était réellement élastique), indique le sens et l'importance de la courbure de la courbe de déformation.

3) Évolution de l'énergie dépensée lors de la déformation

La mesure de la surface sous la courbe de déformation représente le travail fourni pour cette déformation. La courbe représentant l'évolution de l'énergie moyenne dépensée pour rompre la pellicule de la baie

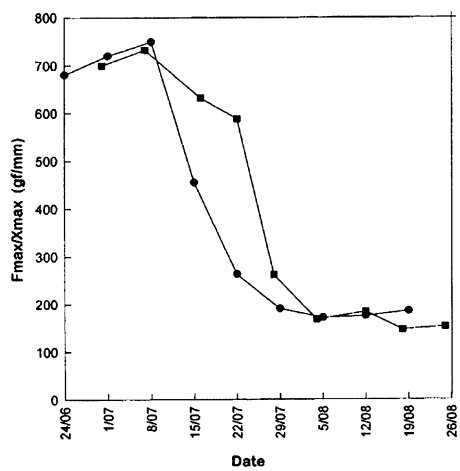


Fig. 9 — Evolution de la fermeté à la rupture (Fmax/Xmax) au cours de la maturation des raisins Gamay (●) et Syrah (■), en 1994.

Fig. 9 — Evolution of the bursting firmness (Fmax/Xmax) during the ripening of Gamay (●) and Chiraz (■) grapes, in 1994.

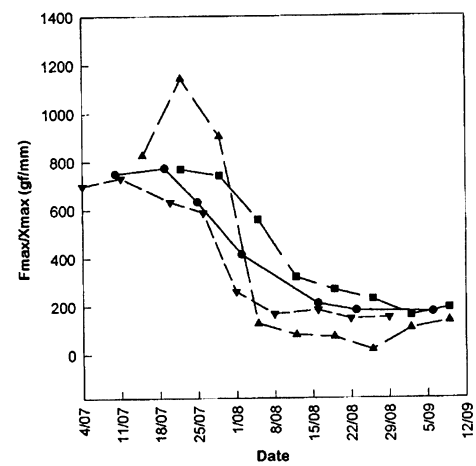
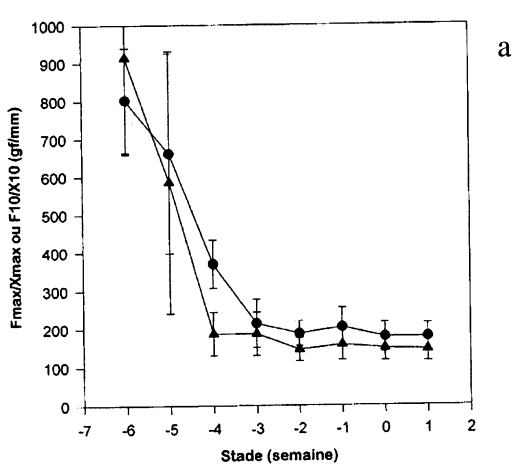


Fig. 10 — Evolution de la fermeté à la rupture (Fmax/Xmax) au cours de la maturation du raisin Syrah pour les millésimes 1992 (■), 1993 (▲), 1994 (▼) et 1995 (●).

Fig. 10 - Bursting firmness evolution (Fmax/Xmax) during the ripening of Chiraz grape for the vintages 1992 (■), 1993 (▲), 1994 (▼) et 1995 (●).



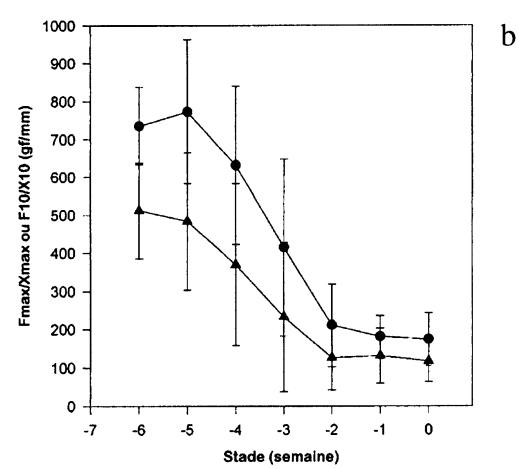


Fig. 10 — Evolution comparée de la fermeté à la rupture (Fmax/Xmax) et de la fermeté initiale (F10/X10)

A : courbe moyenne pour 8 prélèvements de baies de Gamay en 1993 - B : courbe moyenne pour 7 prélèvements de baies de Syrah en 1996

Fig. 10 — Compared evolution of the bursting firmness (Fmax/Xmax) with the initial firmness (F10/X10)

A : mean curve for 8 samples of Gamay grape in 1993. B : mean curve for 7 samples of Chiraz grape in 1996

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

a la même allure que celle des évolutions des paramètres de fermeté (figure 12). Ce paramètre énergétique peut aussi être utilisé pour caractériser le ramollissement de la baie, mais, considéré seul, il ne peut rendre compte comme les paramètres précédents pris séparément, ni du sens, ni de l'intensité de la courbure. Il est aussi possible de calculer l'énergie totale dépensée sur l'ensemble de la déformation (jusqu'au maximum de déformation imposé).

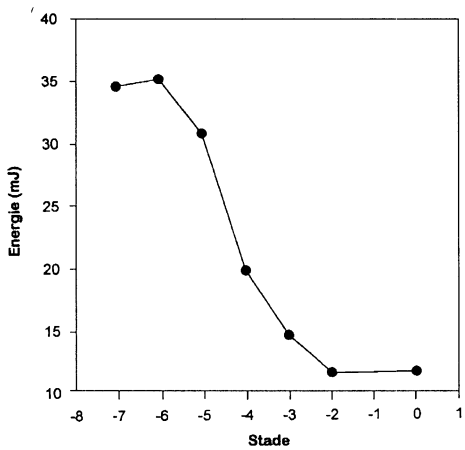


Fig. 12 — Evolution de l'énergie moyenne dépensée jusqu'à la rupture pelliculaire pour 7 prélèvements de baies de Syrah en 1996.

Fig. 12 — Evolution of the mean consumed energy up to the berry skin breaking for 7 samples of Chiraz berries in 1996

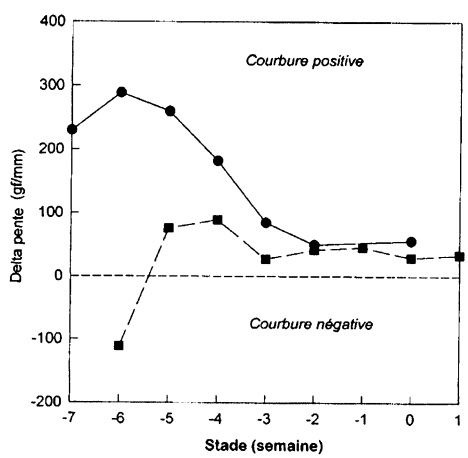


Fig. 13 — Evolutions de la courbure moyenne des courbes de déformation déterminée à partir du « delta de pente » (Fmax/Xmax - F10/X10), pour 7 prélèvements de baies de Syrah en 1996 (●) et pour 8 échantillons de baies de Gamay en 1993 (■).

Fig. 13 - Evolutions of the mean curvature of the deformation curves determined from the « slope difference » (Fmax/Xmax - F10/X10), for 7 samples of Chiraz berries in 1996 (●) and for 8 samples of Gamay berries in 1993 (■).

4) Évolution de la courbure des courbes de déformation

La différence entre les deux paramètres de fermeté (Fmax/Xmax - F10/X10) ou « delta de pente », est l'une des façons de caractériser le sens et l'intensité de la courbure des courbes de déformation. Pour exemple, on a reporté sur la figure 13 les évolutions du delta de pente moyen pour les deux cépages Gamay et Syrah. On observe que pour la Syrah la courbure est toujours positive et qu'elle décroît régulièrement avec le degré de maturité alors que pour le Gamay le sens de courbure passe du négatif pour les baies vertes au faiblement positif cinq semaines avant la vendange, avec un maximum vers la véraison. Les différences de courbure sont, comme on vient de le voir, fonction du cépage mais aussi des conditions imposées par l'environnement (définissant le millésime).

L'autre façon de caractériser le sens et l'intensité de la courbure des courbes de déformation est le « delta de surface » (cf. II). Les courbes représentées sur la figure 14 permettent de montrer que, pour un même cépage, les deux modes de caractérisation ne sont pas forcément équivalents. La discordance observée dans le cas de l'exemple montré sur la figure, notamment pour les baies vertes (« delta de surface » négatif), indique que la forme des courbes de déformation n'est pas toujours conforme aux types schématisés en figure 4. Un certain nombre de courbes à allure sigmoïde ou perturbées par la présence des pépins (pour

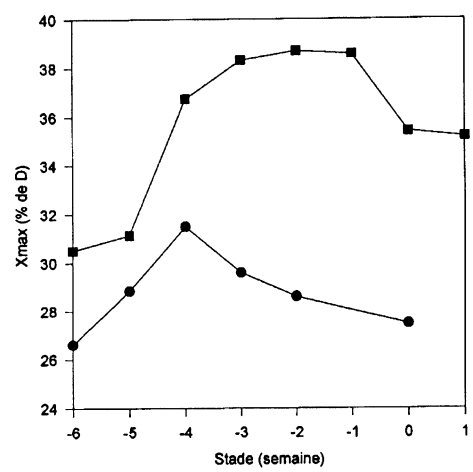


Fig. 14 — Evolutions comparées des deux modes d'appréciation de la courbure moyenne des courbes de déformation, le « delta de pente » (●) et le « delta de surface » (■), pour 7 prélèvements de baies de Syrah en 1996.

Fig. 14 —Compared evolutions of the two estimation modes for the mean curvature of the deformation curves, the « slope difference » (●) with the « surface difference » (■), for 7 samples of Chiraz berries in 1996.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

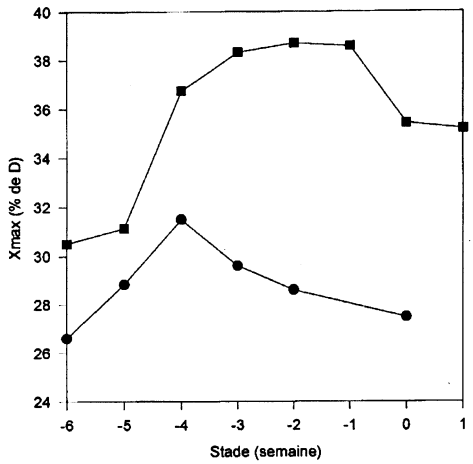


Fig. 15 — Evolutions comparées du déplacement moyen maximum à la rupture (Xmax) pour 6 prélèvements de baies de Syrah en 1995 (●) et pour 8 prélèvements de baies de Gamay en 1993 (▲).

Fig. 15 — Compared evolutions of the mean maximum displacement (Xmax) for 6 samples of Chiraz berries in 1995 (●) and for 8 samples of Gamay berries in 1993 (▲).

de petites baies au stade très vert par exemple) sont à l'origine de cette divergence.

5) Evolution du déplacement à la rupture

L'évolution du déplacement moyen à la rupture est rapportée sur la figure 15, pour les cépages Gamay et Syrah. D'une façon générale les ruptures pelliculaires se produisent pour des déplacements compris entre 25 et 40 p. cent du diamètre des baies. Conformément à ce qui a été observé lors de l'examen de la relation entre Xmax et la fermeté à la rupture (figure 8), l'évolution de ce paramètre très peu dépendant du « delta de pente », passe par un maximum au voisinage de la véraison (Syrah) ou une ou deux semaines avant la vendange (Gamay). Si l'on admet que ce paramètre est indicatif de la résistance pelliculaire, on peut donc dire que, pour les exemples donnés, la pellicule des baies de Gamay est plus résistante que celle de la Syrah. Il est évident que de telles différences ne sont pas sans conséquence au point de vue technologique.

V — RELATION AVEC LA COLORATION

La concomitance entre le démarrage du ramollissement des baies et le début de leur changement de couleur a déjà été rapportée (ROBIN *et al.*, 1996 b et figure 16 A). Des relations plus précises liant les deux phénomènes peuvent être exprimées si l'on examine les distributions des couples : paramètre chromatique/ fermeté à la rupture. Dans l'exemple présenté sur la figure 16 B, on peut remarquer deux principaux nuages de points, l'un correspondant aux baies vertes à fermeté supérieure à 700 gf/mm (valeur considérée comme indiquant la véraison rhéologique, VR) et à angle de teinte voisin de 110°, l'autre correspondant aux baies ayant véré à fermeté inférieure à 400 gf/mm (valeur considérée comme indicative de la véraison au sens classique, VC). Pour ce deuxième nuage, l'angle de teinte diminue de façon pratiquement linéaire avec la fermeté. Dans la zone intermédiaire située entre VR et VC, des baies ont commencé à se ramollir et à changer de couleur, la pigmentation rouge caractérisant l'apparition des composés anthocyaniques se produisant au niveau de VC.

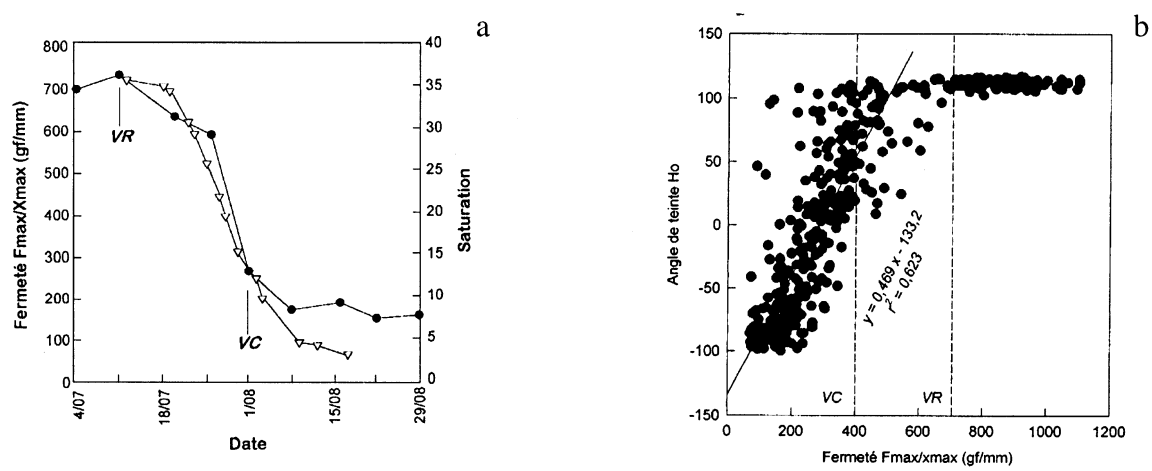


Fig. 16 — Relation entre la fermeté et la couleur des baies.

A : évolutions comparées de la fermeté à la rupture (●) et de la saturation de la couleur (▲) pour la Syrah en 1994 ;
B : distribution des couples de valeurs angle de teinte - fermeté à la rupture pour un échantillon issu de grappillons de Syrah contenant des baies vertes et plus ou moins mûres, en 1995. *VR* : véraison rhéologique ; *VC* : véraison classique.

Fig. 16 - Relation between firmness and colour of berries.

A : compared evolutions of the bursting firmness (●) with the saturation of the colour (▲) for Chiraz grape in 1994. B : distribution of hue - bursting firmness couples for a sample issued from Chiraz grappillons with riped and unriped berries mixed together, in 1995.
VR : rheological veraison ; *VC* : classical veraison.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

DISCUSSION

Parmi les données enregistrées par le rhéomètre Pénélaup au cours de l'écrasement d'une baie de raisin, la valeur de la contrainte Fmax au moment de l'éclatement peut permettre de chiffrer sa résistance mécanique ou sa fermeté (ABBAL et PLANTON, 1990 ; ABBAL *et al.*, 1992). Cependant, cette valeur ne peut être utilisée pour caractériser les propriétés mécaniques moyennes d'un échantillon représentatif de baies, car elle est fonction de leur diamètre (ROBIN *et al.*, 1996a).

L'analyse exhaustive des données permet de définir la déformation par un certain nombre de paramètres rhéologiques. Des paramètres qui prennent en compte la variabilité de la taille des baies d'un échantillon donné peuvent être considérés comme des coefficients d'élasticité caractérisant la résistance mécanique ou la fermeté moyenne de l'échantillon : c'est le cas des deux indices Fmax/Xmax et F10/X10. Le premier qualifié de fermeté initiale correspondrait au coefficient d'élasticité du fruit entier au démarrage de la contrainte, alors que le second, qualifié de fermeté à la rupture, correspondrait au coefficient d'élasticité de la pellicule de la baie. D'autres paramètres, comme le « delta de pente » ou le « delta de surface » permettent de rendre compte du type de déformation, c'est-à-dire, de la déviation présentée par la courbe de déformation par rapport au comportement typiquement élastique. Un seul paramètre, le pourcentage du diamètre de la baie auquel s'effectue l'éclatement (Xmax), permet d'avoir une idée de la fragilité de la pellicule ou de sa résistance au déchirement. Enfin, des paramètres issus de l'intégration de la surface sous les courbes de déformation permettent de caractériser la déformation sur un plan énergétique.

Les résultats obtenus à partir des différents cépages étudiés sur plusieurs années, permettent de conclure que le comportement rhéologique de la baie de raisin n'est pas un comportement élastique, sauf pour des baies à deux phases très différentes de leur développement, pour des baies très vertes et pour des baies très mûres. A ces deux périodes de développement, un certain nombre de baies manifestent un comportement proche du comportement élastique. En dehors de ces deux périodes, notamment à la véraison, les courbes de déformation présentent une courbure qui est généralement positive (selon le sens de courbure défini par convention), quelques baies vertes ou très mûres pouvant cependant présenter des courbures négatives. La relation existant entre la fermeté initiale et la fermeté à la rupture apparaît particulièrement utile pour caractériser l'évolution du comportement rhéologique de la baie de raisin au cours de sa maturation. La courbe résultante qui caractérise cette évolution est bien sûr fonction du cépage, mais également de toutes les autres conditions environnementales (terroir, millésime...). Le degré de courbure à un stade de maturation donné, degré qui peut être représenté par l'un ou l'autre des paramètres « delta », peut être le reflet de l'état de turgescence de la baie ou en quelque sorte, de son degré de remplissage. Il est bien connu que cet état dépend notamment des conditions hydriques dans lesquelles s'effectue la maturation.

Le ramollissement général des baies au moment de leur maturation est aussi un fait bien connu. La mesure ou le calcul des paramètres rhéologiques moyens précédents tout au long de la période de maturation permet de quantifier et de suivre la dynamique du ramollissement de la population de baies. Cette dynamique est fonction du cépage, du millésime mais également des facteurs environnementaux. D'une façon générale, la diminution des indices de fermeté apparaît dès les premières modifications de couleur des baies. Quel que soit le paramètre considéré, la valeur des écarts types, à chaque stade de maturité, est aussi à prendre en compte pour caractériser pleinement le comportement rhéologique. L'écart type est en général maximum au moment où l'on observe le plus grand asynchronisme entre les baies (véraison au sens classique, ie apparition des composés anthocyaniques). Si l'on admet que le paramètre Xmax, mesurant le déplacement maximum à la rupture de la baie, est indicatif de la résistance à la déchirure de la pellicule, on constate que cette résistance est maximum au moment de la véraison.

On peut considérer en première approximation, que l'entité baie est un solide déformable non homogène qui, contrairement à des fruits plus gros comme les abricots ou les pommes, fournit une réponse rhéologique unique indépendante de l'endroit précis où s'effectue la contrainte. On peut aussi admettre que ce solide est une dualité constituée par deux éléments : un élément élastique, le contenant ou sac, représenté par la pellicule, et un élément, le contenu, de type gel plus ou moins déformable mais incompressible, représenté par la pulpe (les pépins venant perturber le comportement, notamment au stade vert).

Comme on en a fait l'hypothèse, les différents paramètres peuvent être inférés aux deux principales structures tissulaires définies pour un tel modèle. Le degré de remplissage du sac peut être, entre autre, concrétisé par les indices « delta ».

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

CONCLUSION

Bien qu'il soit encore prématuré pour interpréter, sur les plans structurel et tissulaire, la réponse à la déformation d'une baie de raisin, les différents paramètres ou indices rhéologiques définis dans cet article permettent une caractérisation précise de la résistance mécanique et de la déformabilité d'une baie de raisin ou d'une population de baies donnée. Il est ainsi possible à partir de l'analyse exhaustive des données fournies par le rhéomètre Pénélaup, de discriminer des effets cépage, des effets millésime et même des effets liés au terroir ou à l'environnement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABBAL P. et PLANTON G., 1990. La mesure objective de la fermeté des fruits et légumes. *IX^e colloque sur les recherches fruitières*, 4-6 décembre, Avignon, pp. 69-83.

ABBAL P. et PLANTON G., 1991. Dispositif pour déterminer automatiquement des caractéristiques physiques d'un produit et procédé de mise en œuvre au moyen de ce dispositif. Brevet Europe n° 91 400 150 8, INRA-CTIFL.

ABBAL P., BOULET J.C. et MOUTOUNET M., 1992. Utilisation de paramètres physiques pour la caractérisation de la véraison des baies de raisin. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **26**, n°4, 231-237.

BAILLOD M. et BAGGIOLINI M., 1993. Les stades repères de la vigne. *Rev. Suisse Vitic. Arboric. Hortic.*, **25**, n°1, 7-9.

COMBE B.G. and BISHOP G.R., 1980. Development of the grape berry. Changes in diameter and deformability during veraison. *Aust. J. Agric.Res.*, **31**, 499-509.

CREASY G.L. and LOMBARD P.B., 1993. Vine water stress and peduncle girdling effects on pre- and post-veraison grape berry growth and deformability. *Am. J. Enol. Vitic.*, **44**, n°2, 193- 197.

DUPRAT F., GROTTE M.G., PIETRI E. and STUDMAN C.J., 1995. A multi-purpose firmness tester for fruits and vegetables. Computers and Electronics in Agriculture, **12**, 211-223.

FLANZY C., FLANZY M., ANDRE P. et CHAMBROY Y., 1969. Fixation à l'obscurité du $^{14}CO_2$ gazeux dans les baies de raisin en anaérobiose. II. Devenir du 14C au cours de la fermentation intracellulaire. *Ann. Technol. Agric.*, **18**, 307-325.

NICOLAS J., BURET M., DUPRAT F., NICOLAS M., ROTHAN C. and MORAS P., 1987. Development of a non destructive test for firmness measurement during cool storage of kiwifruit. *In : XVII Internationaler Kongress Für Kältetecchnik, Vienna. Institut National du Froid*, Paris, pp. 339-344.

ROBIN J.P., ABBAL P. et FLANZY C., 1996 a. La fermeté des baies de raisin : définition d'un indice de fermeté, corrélation avec les modifications de couleur et application à la détection précoce de la véraison. *V^e Symp. Int. Œnol.*, Bordeaux, 15-17 juin 1995, Coordonnateur A. Lonvaud-Funel, Ed. Technique et Documentation, Londres, Paris, New-York, pp. 109-114.

ROBIN J.P., LOPEZ F., ROUJOU DE BOUBEE D., IGOUNET O., SAUVAGE F.X., PRADAL M., VERRIES C., 1996 b. La coloration des baies du raisin Syrah au cours de leur maturation. Relation entre les descripteurs de la couleur, dynamique *in situ* et influence des facteurs de l'environnement. *J. Int. Sci. Vigne Vin, **30***, n°4, 1-13.

SOUTY M., AUDERGON J.M. and DUPRAT F., 1991. Physical and biochemical criteria for apricot varieties characterisation. *Acta Hortic.*, **293**, 95-109.

Manuscrit reçu le 30 juillet 1997 ;
accepté pour publication le 17 septembre 1997.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)