

L'ÉVALUATION DU RÉGIME HYDRIQUE DE LA VIGNE À PARTIR DU RAPPORT ISOTOPIQUE $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. L'INTÉRÊT DE SA MESURE SUR LES SUCRES DU MOÛT À MATURITÉ

THE ASSESSMENT OF VINE WATER UPTAKE CONDITIONS BY $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ DISCRIMINATION IN GRAPE SUGAR

VAN LEEUWEN C.^{1, 2}, GAUDILLÈRE J.-P.³ et TREGOAT O.^{1, 2}

1 : ENITA de Bordeaux, 1 cours du Général de Gaulle, B.P. 201, 33175 Gradignan cedex (France)

2 : Faculté d'œnologie de Bordeaux, 351 cours de la Libération, 33405 Talence cedex (France)

3 : INRA-AGRONOMIE, Domaine de la Grande Ferrade, Pont de la Maye,
33140 Villenave d'Ornon cedex (France)

Résumé : Le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans les produits primaires de la photosynthèse varie en fonction des conditions d'alimentation en eau de la plante. Il est montré dans ce travail que le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (appelé $\Delta\text{C}13$), mesuré sur les sucres ou l'acide tartrique du moût, constitue un bon indicateur du régime hydrique de la vigne pendant la période de maturation. Cette méthode présente l'avantage de ne pas nécessiter d'équipement lourd, car l'analyse peut être réalisée en prestation de service, et elle ne demande pas de mesures sur le terrain.

Summary: Carbon isotope discrimination in primary products of photosynthesis varies with plant water uptake conditions. This property was used to show that the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio (called $\Delta\text{C}13$) in grape sugars and tartrate measured at ripeness can be a valuable indicator of vine water deficit. Correlation between $\Delta\text{C}13$ in grape sugar and minimum pre-dawn leaf water potential is excellent ($R^2 = 0,81$; $n = 36$). A statistically significant effect of soil and vintage is pointed out. When measured on a great number of plots of an estate, $\Delta\text{C}13$ varies with the soil type. This proves $\Delta\text{C}13$ can be a valuable tool in « terroir » studies. $\Delta\text{C}13$ measured on phenolic compounds in wine is also significantly correlated to minimum pre-dawn leaf water potential as well as to $\Delta\text{C}13$ in grape sugar. $\Delta\text{C}13$ is actually the only tool capable to assess global vine water uptake conditions between veraison and harvest at a low cost, without the installation of heavy equipment in the vineyard.

Mots clés : vigne, déficit hydrique, discrimination isotopique, carbone, $\Delta\text{C}13$, potentiel foliaire, sol, climat, terroir.

Key words: vine, water deficit, isotope discrimination, carbon, $\Delta\text{C}13$, leaf water potential, soil, climate, terroir.

INTRODUCTION

De très nombreux travaux sont consacrés à l'alimentation en eau de la vigne. La vigne est souvent cultivée dans des conditions d'alimentation en eau limitante, notamment dans des sites réputés pour la qualité du vin produit. L'arrêt de croissance de la vigne est généralement déterminée par l'apparition d'un déficit hydrique (MATTHEWS *et al.*, 1987 ; VAN LEEUWEN et SEGUIN, 1994). Un arrêt de croissance précoce limite la croissance végétative pendant la période de maturation et favorise ainsi l'alimentation carbonée de la baie. Il améliore également le potentiel œnologique du raisin en améliorant le micro climat lumineux de la canopée et de la grappe (SMART and ROBINSON, 1991). Les déficits hydriques pré-veraison limitent la taille des baies (HARDIE and CONSIDINE, 1976) ce qui permet d'atteindre plus

facilement des teneurs optimales des baies en sucres et en anthocyanes (MATTEWS and ANDERSON, 1988 ; VAN LEEUWEN et SEGUIN, 1994). Une limitation de l'alimentation en eau de la vigne réduit la teneur en acide malique des baies (VAN LEEUWEN et SEGUIN, 1994 ; CHONE *et al.*, 2001a). La régulation de l'alimentation en eau de la vigne à un niveau plutôt faible est donc un important facteur de qualité. Elle joue un rôle majeur dans l'effet « terroir » (DUTEAU *et al.*, 1981 ; SEGUIN, 1986 ; VAN LEEUWEN et SEGUIN, 1994 ; KOUNDOURAS *et al.*, 1999).

Il existe de nombreuses techniques pour évaluer le régime hydrique de la vigne. Les plus anciennes sont basées sur la mesure de la quantité d'eau dans le sol (gravimétrie ou humidimètre à neutrons) ou de sa disponibilité pour la plante (tensiométrie). Les indicateurs physiologiques constituent une autre approche, par

l'évaluation de l'état hydrique à partir de mesures réalisées sur la plante elle-même. Ces indicateurs physiologiques sont nombreux : potentiel foliaire, potentiel de base ou potentiel tige (SCHOLANDER *et al.*, 1965 ; BEGG et TURNER, 1970 ; CHONE *et al.*, 2001b), micro variations de diamètre d'organes de la vigne (MYBURGH, 1996 ; VAN LEEUWEN *et al.*, 2000), débit de sève (VALANCOGNE et NASR, 1993) et transpiration (HSIAO, 1973). D'autres techniques font intervenir des paramètres méso climatiques ou micro climatiques : bilan hydrique théorique (RIOU, 1994 ; LEBON *et al.*, 1995) et Crop Water Stress Index (CWSI), déterminé à partir du Δt air-feuille (RIOU et LEBON, 2000). Parmi ces techniques, la plupart nécessitent un équipement matériel difficile à mettre en œuvre (humidimètre à neutrons, micromorphométrie, débit de sève). Les tensiomètres ne permettent pas de mesurer l'ensemble de la gamme de déficits hydriques rencontrée chez la vigne. La mesure des potentiels foliaires, de la transpiration et du CWSI peuvent mettre en évidence l'état hydrique instantané de la vigne avec une grande précision, mais l'extrapolation des conditions de l'alimentation en eau de la vigne sur l'ensemble de la saison nécessite des mesures répétées sur le terrain. Le bilan hydrique théorique implique la connaissance de la réserve en eau du sol au début de la saison, ce qui est rarement le cas à cause de l'enracinement profond et hétérogène de la vigne. Il n'existe donc actuellement aucune grandeur, facilement mesurable sur un grand nombre de parcelles à un coût réduit, qui permet d'évaluer de façon globale et intégratrice les conditions d'alimentation en eau de la vigne au cours de la saison.

Les isotopes stables du carbone sont discriminés par la photosynthèse (FARQUHAR *et al.*, 1980). Dans le carbone du CO₂ atmosphérique, les proportions de ¹²C et ¹³C sont respectivement de 98,9 p. cent et de 1,1 p. cent. La photosynthèse incorpore préférentiellement le ¹²C, qui est plus léger. La contrainte hydrique, en provoquant la fermeture des stomates pendant une partie de la journée, ralentit les échanges de CO₂ entre la feuille et l'atmosphère et limite ainsi la discrimination isotopique. Le rapport ¹³C/¹²C (appelé $\Delta C13$) se rapproche, dans ces conditions, de celui dans le CO₂ atmosphérique. Le rapport isotopique ¹³C/¹²C dans les produits primaires de la photosynthèse varie donc en fonction de la contrainte hydrique subie par la plante au moment de leur synthèse (FARQUHAR *et al.*, 1989 ; ELHERINGER *et al.*, 1993 ; GAUDILLÈRE *et al.*, 1999). DAY *et al.* (1995) ont mesuré le rapport $\Delta C13$ sur l'alcool éthylique du vin et ont établi un lien avec la région de production et le millésime. Dans le présent travail est évaluée la possibilité d'utiliser le rapport $\Delta C13$, mesuré sur les sucres du moût à maturité, comme

indicateur global de la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la période de maturation.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

I - LE RÉSEAU EXPÉRIMENTAL ET LES SOLS

La première partie de l'étude est conduite sur un réseau expérimental de 9 micro parcelles de 100 ceps chacune, situé sur la commune de Saint-Emilion (Gironde, France). Ce réseau résulte de la combinaison entre les trois principaux cépages rouges du Bordelais (*Vitis vinifera* L. var. Merlot, Cabernet franc et Cabernet-Sauvignon) et trois sols, un sol graveleux (G), un sol à sous-sol très argileux (A) et un sol sableux avec une nappe d'eau à portée des racines (S). Ces trois sols ont été choisis pour leur comportement hydrique contrasté, notamment en année sèche.

- Le sol graveleux comporte plus de 50 p. cent d'éléments grossiers sur toute la hauteur du profil (figure 1a). La terre fine est à dominante sableuse. Par conséquent, la réserve hydrique est faible, ce qui induit une alimentation en eau fortement limitante en conditions estivales sèches.

- Le sol à sous-sol très argileux présente, au-delà de 40 cm de profondeur, un pourcentage d'argile supérieur à 50 p. cent (figure 1b). À cause d'un potentiel matriciel élevé (en valeur absolue), un faible déficit hydrique de la vigne peut apparaître précocement. Cependant, en raison de réserves en eau plus fortes, le sol argileux n'induit jamais un stress hydrique aussi intense que celui qui peut être observé sur le sol graveleux.

- Le sol sableux présente une texture sableuse jusqu'à 100 cm de profondeur et sablo-argileuse au-delà (figure 1c). Ce sol comporte une nappe d'eau à portée des racines. Malgré une forte amplitude de battement de la nappe entre son niveau hivernal (-60 cm) et son niveau estival (-160 cm), l'alimentation en eau de la vigne est rarement limitante sur ce type de sol.

Toutes les parcelles sont plantées à une densité de 6 000 ceps/ha (140 cm entre les rangs et 120 cm entre les ceps sur le rang). Les vignes sont conduites en mono-plan vertical et taillées en guyot simple. La hauteur du tronc est de 40 cm et la hauteur de rognage 150 cm, ce qui donne un rapport H/E proche de 0,8 et une absorption d'environ 45 p. cent du rayonnement global en été. Les vignes sont adultes (>25 ans). Les porte-greffes sont issus d'un croisement entre *Vitis Riparia* et *Vitis Rupestris* (3309 C sur G et A et 101-14 MG sur S). Le niveau de rendement est proche de 1 kg par cep, soit 6 tonnes/ha.

II - LES CONDITIONS CLIMATIQUES

Le réseau de parcelles est situé à l'intérieur d'un périmètre réduit (rayon de 500 m) dans un secteur faiblement accidenté, ce qui exclut des variations climatiques entre les parcelles au cours d'une même année. L'étude a été conduite sur la période 1997-2000.

- 1997 a été une année chaude et pluvieuse. Les précipitations ont été relativement importantes au mois d'août, ce qui se traduit pas un bilan hydrique théorique de -122 mm au 31 août (figure 2, bilan hydrique réalisé d'après RIOU et LEBON, 2000).

- 1998 a été une année chaude et sèche dans le Bordelais. Le bilan hydrique théorique accuse un déficit de -271 mm au 31 août (figure 2).

- 1999 a été une année assez chaude et plutôt humide. Le bilan hydrique théorique, qui s'établit à -175 mm au 31 août, reste néanmoins plus fortement négatif que celui observé en 1997 (figure 2).

- 2000 a été une année assez chaude, à l'exception du mois de juillet. Les précipitations ont été supérieures aux normales au début de l'année et au mois de juillet, mais grâce à des mois de juin et août peu plu-

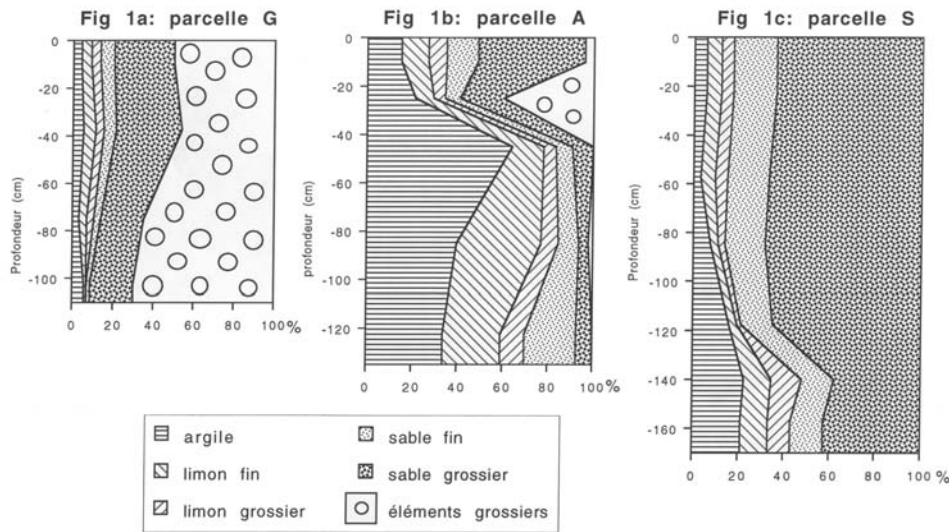


Fig. 1 - Pourcentage des différentes fractions granulométriques en fonction de la profondeur d'un sol graveleux (a), d'un sol à sous-sol très argileux (b) et d'un sol sableux (c).

Soil texture of a gravelly soil (a), a soil with a heavy clay sub-soil (b) and a sandy soil (c).



Fig. 2 - Bilan hydrique théorique des millésimes 1997, 1998, 1999 et 2000, d'après RIOU et LEBON (2000).
Station : Saint-Émilion.

Mean water balance according to RIOU et LEBON (2000), calculated for 1997, 1998, 1999 and 2000 vintage. Data: Saint-Émilion.

vieux, le bilan hydrique théorique s'établit à -239 mm au 31 août (figure 2).

Ces millésimes se classent donc, du plus humide au plus sec : 1997>1999>2000>1998.

III - LES PARCELLES AGRONOMIQUES

La deuxième partie de cette étude a été réalisée dans la commune de Saint-Émilion sur 15 parcelles de *Vitis vinifera* L. var. Merlot et 15 parcelles de *Vitis vinifera* L. var. Cabernet franc, implantées sur des sols comparables à ceux du réseau expérimental. Il s'agit de parcelles variant en taille de 0,3 ha à 1,4 ha. Le système de conduite est celui décrit pour le réseau expérimental. Les porte-greffes sont variables (*Riparia* Gloire de Montpellier, 3309 C, 101-14 MG, SO4 et 5BB).

IV - LE RÉGIME HYDRIQUE DE LA VIGNE

L'état hydrique de la vigne est évalué au cours de la saison par la mesure du potentiel hydrique foliaire de base à raison d'une mesure tous les 10 jours, entre le début du mois de juillet et la récolte, à l'aide d'une chambre à pression (SCHOLANDER *et al.*, 1965). Toutes les mesures ont été réalisées sur des feuilles primaires, saines, localisées dans la zone des grappes.

V - LA MESURE DU RAPPORT ISOTOPIQUE $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$

Le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (ΔC13) est mesuré sur divers constituants à maturité. 600 à 700 baies sont prélevées au hasard par petites fractions de grappe au moment de la maturité et pressées à l'aide d'un micro presseur pneumatique de type BELLOT (Gradignan, Gironde, France) à 0,5 Mpa. Le rapport ΔC13 des sucres est mesuré directement sur le moût autoclavé et le rapport ΔC13 de l'acide tartrique est mesuré sur le bitartrate de potassium obtenu par précipitation à froid. Chaque échantillon a été oxydé à l'aide d'oxygène pur et le contenu isotopique du carbone a été déterminé à l'aide d'un spectromètre de masse à flux continue (Europe Scientific Ltd., Crewe, UK ; AVICE *et al.*, 1996). Les résultats sont exprimés relativement au standard Pee Dee Belemite (FARQUHAR *et al.*, 1989).

$$\Delta\text{C13} = \frac{\text{Rs} - \text{Rb}}{\text{Rb}} * 1000 \text{ (exprimé en ‰)}$$

Où:

- Rs est le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans l'échantillon et
- Rb est le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ du standard PDB.

La constitution isotopique du CO_2 atmosphérique donne un ΔC13 de -8 ‰ (FARQUHAR *et al.*, 1989).

VI - MICRO VINIFICATIONS

En 1997, 1998 et 1999 des micro vinifications ont été réalisées dans des conditions standardisées à partir de 40 kg de raisins de chaque parcelle du réseau expérimental.

Tableau I - Répétabilité de la mesure du ΔC13 sur les sucres du moût à maturité.

Repetability of the measurement of ΔC13 on grape sugar at ripeness.

Répétition	ΔC13
1	-22,88
2	-22,87
3	-22,87
4	-22,95
5	-23,02
6	-22,89
7	-22,93
8	-22,97
Moyenne	-22,92
Écart type	0,051
Erreur sur la mesure	0,121

Tableau II - Analyse de variance à trois facteurs effectuée sur les résultats du ΔC13 (millésime, sol, cépage).

Test Newman-Keuls de groupes homogènes au seuil de 5p. cent.

3 Factor analysis of variance of the ΔC13 data (vintage, soil, cultivar).

Test Newman Keuls at 5 p. cent significance level.

Statistiques		
	Probabilité	
F1 = millésime	0	
F2 = sol	0	
F3 = cépage	0,0003	
Facteur millésime		
	Moyennes	Groupes homogènes
1998	-22,20	A
2000	-23,18	B
1999	-24,05	C
1997	-24,14	C
Facteur sol		
	Moyennes	Groupes homogènes
Graves	-22,05	A
Argile	-23,29	B
Sables	-24,54	C
Facteur cépage		
	Moyennes	Groupes homogènes
Cabernet-Sauvignon	-23,25	A
Cabernet franc	-23,29	A
Merlot	-23,63	B

VII - TRAITEMENT STATISTIQUE

Les résultats ont été analysés à l'aide des logiciels EXCEL pour les corrélations et STATBOX pour les analyses de variance et les tests Newman et Keuls.

RÉSULTATS

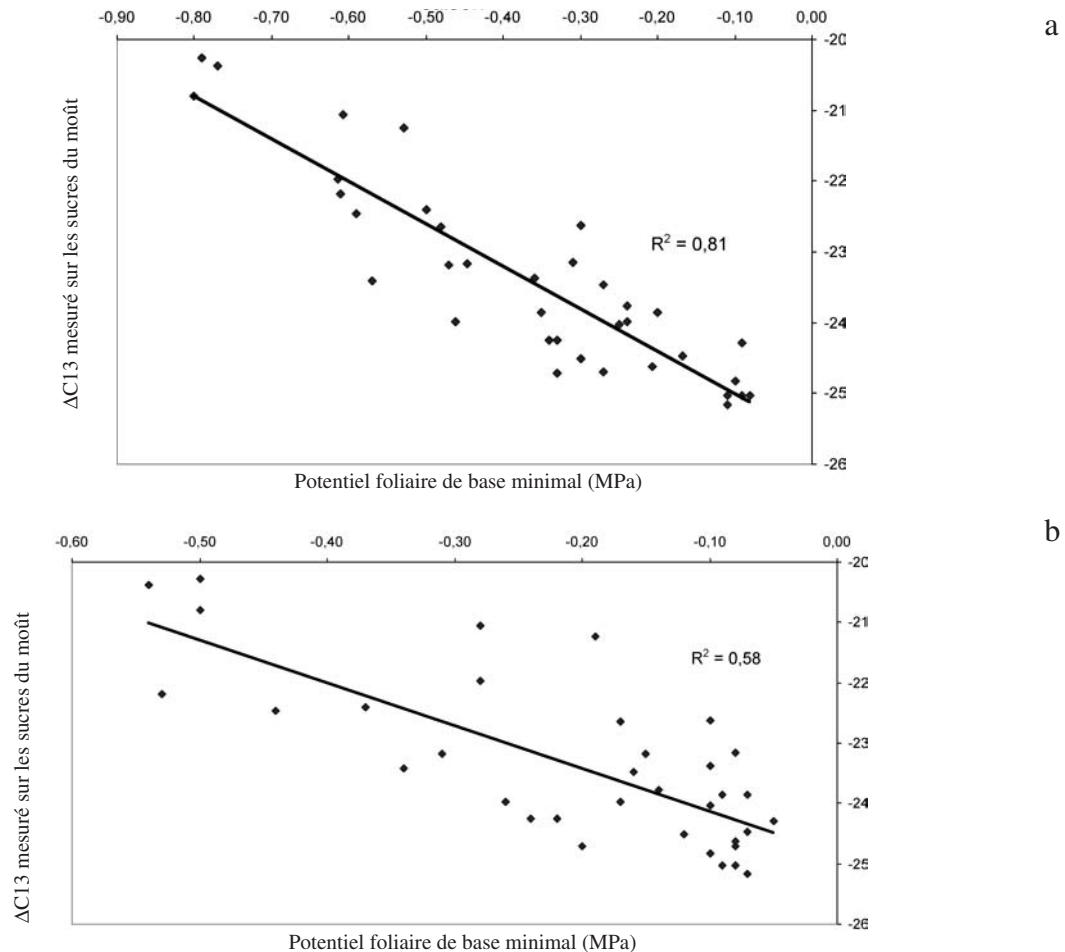
I - PRÉCISION DE LA MÉTHODE DE DÉTERMINATION DU $\Delta C13$

8 analyses du rapport $\Delta C13$ ont été réalisées sur les sucres d'un moût afin de déterminer la reproductibilité de la méthode (tableau I). Elles ont permis de déterminer un coefficient de variation de 0,2 p. cent et une erreur sur la mesure de +/- 0,121 (au seuil de 5 p. cent).

II - PERTINENCE DU RAPPORT ISOTOPIQUE $\Delta C13$ COMME INDICATEUR GLOBAL DE LA CONTRAINTE HYDRIQUE SUBIE PAR LA

VIGNE PENDANT LA PÉRIODE DE MATURATION DU RAISIN.

Sur l'ensemble du réseau expérimental (9 parcelles), le suivi du régime hydrique a été réalisé pendant 4 années, soit 36 combinaisons possibles entre 3 sols, 3 cépages et 4 millésimes. La corrélation obtenue entre le rapport $\Delta C13$, mesuré sur les sucres du moût à maturité, et le potentiel hydrique foliaire de base minimum est très significative ($R^2 = 0,81$; figure 3a). Dans cette étude, le potentiel foliaire minimal a toujours été atteint entre la mi-véraison et la maturité. La corrélation entre le $\Delta C13$ des sucres et le potentiel foliaire de base mesuré à la mi-véraison est nettement moins bonne ($R^2 = 0,58$; figure 3b), bien qu'elle reste hautement significative. Le rapport $\Delta C13$, mesuré sur les sucres du moût, intègre donc essentiellement la période de contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la maturation.



**Fig. 3 - Corrélation entre le $\Delta C13$ mesuré sur les sucres du moût à maturité et le potentiel foliaire de base minimum mesuré au cours de la saison (a).
La même corrélation avec le potentiel foliaire de base mesuré à la mi-véraison (b).
Correlation between $\Delta C13$ measured on grape sugars at ripeness
and minimum pre dawn leaf water potential (a). Idem with pre dawn leaf water potential measured at veraison (b).**

III - EFFETS DU SOL, DU MILLÉSIME ET DU CÉPAGE SUR LE RAPPORT $\Delta C13$

Le régime hydrique de la vigne est susceptible de varier en fonction du sol (réserve utile et potentiel matriciel de l'eau dans le sol) et du millésime (précipitations et demande évaporative). Une analyse de variance à trois facteurs montre un effet hautement significatif du sol et du millésime sur le rapport $\Delta C13$ (tableau II). Le test Newman et Keuls classe les sols du plus sec au plus humide ($G < A < S$), ainsi que les millésimes (1998 < 2000 < 1999 < 1997). Seule la différence entre 1999 et 1997 est faible et statistiquement non significative. Bien que les moyennes des $\Delta C13$ des trois cépages soient proches, il existe un effet cépage avec des valeurs plus fortement négatives pour le Merlot. Ceci peut traduire une plus faible efficacité de l'eau de ce cépage, comparé aux Cabernets. Dans un travail consacré aux isotopes légers du vin, YUNIANITA *et al.* (1995) signalent un effet cépage sur le rapport $\Delta C13$ mesuré sur

l'alcool éthylique, qu'ils attribuent à un décalage dans le temps du cycle des différents cépages. Chaque cépage rencontrerait des conditions climatiques légèrement différentes (et donc une alimentation en eau différente) en fonction de sa précocité.

IV - LE RAPPORT $\Delta C13$ COMME OUTIL D'ÉTUDE DE L'EFFET TERROIR

La discrimination des échantillons suivant leur type de sol d'origine, mise en évidence par l'ANOVA précédente, permet d'envisager l'utilisation du rapport $\Delta C13$ comme outil d'étude de l'effet terroir. Dans cet objectif, le $\Delta C13$ a été déterminé en 2000 sur 30 parcelles d'une propriété de Saint-Emilion. Les résultats ont été comparés avec une carte des textures (figure 4a et 4b). Il existe une forte concordance entre des valeurs de $\Delta C13$ faiblement négatives (indiquant une contrainte hydrique) et une présence d'éléments grossiers dans le sol. La parcelle 26a présente une exception, car le sol

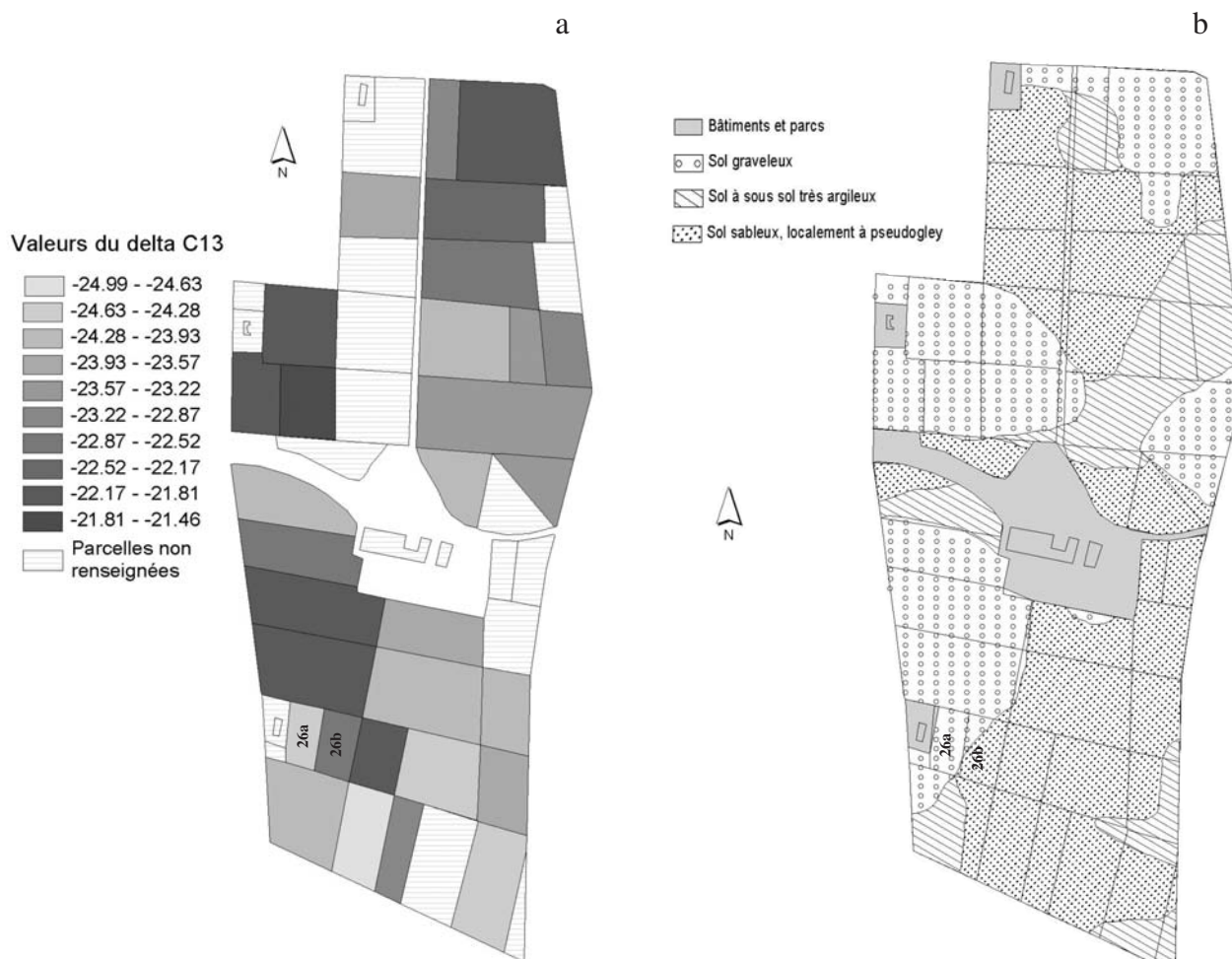


Fig. 4 - Comparaison entre le $\Delta C13$ des sucres du moût, mesuré en 2000 sur un grand nombre de parcelles d'une propriété (a), et la carte des textures de la même propriété (b).

Comparison between grape sugar $\Delta C13$ measured on a great number of plots of an estate in Saint-Emilion in 2000 (a) and a map of the soil textures of the same estate (b).

est graveleux et le $\Delta C13$ fortement négatif. Cependant, la présence d'une nappe d'eau à faible profondeur à cet endroit permet d'expliquer cette apparente contradiction. Le $\Delta C13$ ne permet pas de distinguer les parcelles sableuses des parcelles à sous-sol argileux. Dans cette propriété, la présence d'argile est parfois très localisée et ne peut pas toujours être représentée sur une carte des textures. Ainsi, de nombreuses parcelles comportent en réalité les deux types de textures. Il ne s'agit donc pas forcément de l'incapacité du $\Delta C13$ à distinguer les deux textures, mais d'une imparfaite superposition d'une carte des textures (à contours complexes) et d'une réalité agronomique simplifiée (le parcellaire).

V - LA RELATION ENTRE LA CONTRAINTE HYDRIQUE SUBIE PAR LA VIGNE ET LE $\Delta C13$ MESURÉ SUR L'ACIDE TARTRIQUE ET LES COMPOSÉS PHÉNOLIQUES

Le rapport $\Delta C13$ a également été mesuré sur les anthocyanes du raisin, sur l'acide tartrique du moût et du vin et sur les composés phénoliques du vin. L'acide tartrique du raisin est essentiellement synthétisé avant la véraison, même si des apports à partir de jeunes organes ou des racines pendant la période de maturation ne peuvent être exclus (RIBÉREAU-GAYON, 1966). Le rapport $\Delta C13$, mesuré sur l'acide tartrique du moût, aurait donc pu être l'indicateur d'une éventuelle contrainte hydrique précoce. Cependant, il n'est pas corrélé avec le potentiel hydrique foliaire de base au moment de la véraison, ou avant la véraison. En revanche, le rapport $\Delta C13$ de l'acide tartrique à maturité est bien corrélé avec celui des sucres à maturité ($R^2 = 0,81$; figure 5). Il se produit donc probablement un

turn over important des atomes C de l'acide tartrique pendant la période de maturation. Le $\Delta C13$ de l'acide tartrique du moût peut donc également servir comme indicateur de la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la période de maturation. Le $\Delta C13$ de l'acide tartrique du vin est beaucoup moins bien corrélé à la contrainte hydrique subie par la vigne ($R^2 = 0,26$; figure 6).

Le rapport $\Delta C13$ mesuré sur les anthocyanes du raisin répond très peu à la contrainte hydrique (figure 7a) ; en revanche celui mesuré sur les composés phénoliques du vin est très bien corrélé avec le potentiel hydrique foliaire minimum ($R^2 = 0,73$; figure 7b). Le $\Delta C13$ des composés phénoliques du vin est par ailleurs très bien corrélé avec le $\Delta C13$ des sucres du moût à maturité ($R^2 = 0,84$; figure 8). Cette observation ouvre une voie très intéressante pour déterminer la contrainte hydrique globale subie par la vigne au cours de millésimes antérieurs, à partir de mesures de $\Delta C13$ réalisées sur les composés phénoliques du vin.

DISCUSSION

Il a été montré que la contrainte hydrique modérée de la vigne constitue un facteur très important pour l'obtention de raisins noirs à fort potentiel œnologique (SEGUILIN, 1986 ; MATTHEWS and ANDERSON, 1988 ; VAN LEEUWEN et SEGUILIN, 1994). De très nombreuses méthodes de suivi du régime hydrique de la vigne ont été développées. Cependant, aucune de ces méthodes ne permet d'accéder, de façon intégratrice, à une évaluation de la contrainte hydrique subie

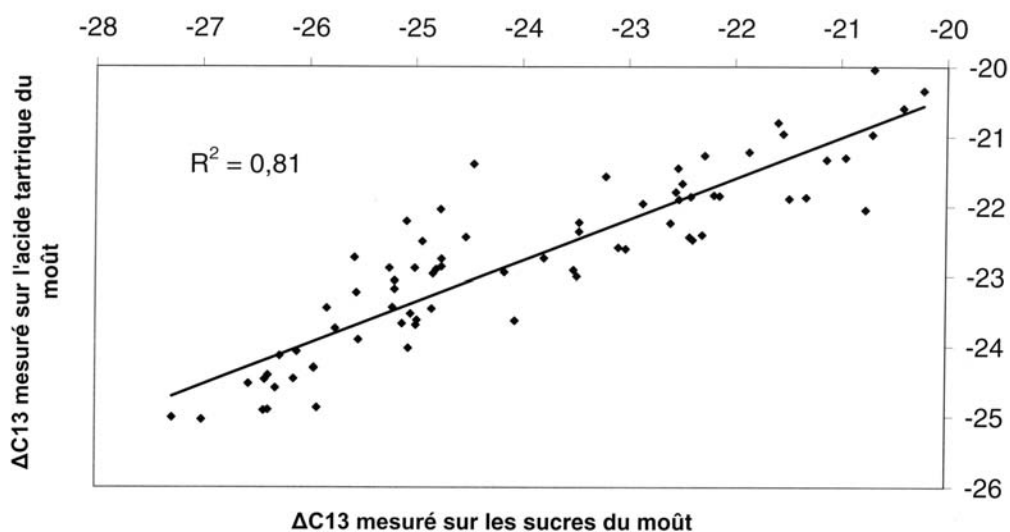


Fig. 5 - Corrélation entre le $\Delta C13$ mesuré sur l'acide tartrique du moût et le $\Delta C13$ mesuré sur les sucres du moût à maturité.

Correlation between must tartrate $\Delta C13$ and must sugar $\Delta C13$, both measured at ripeness.

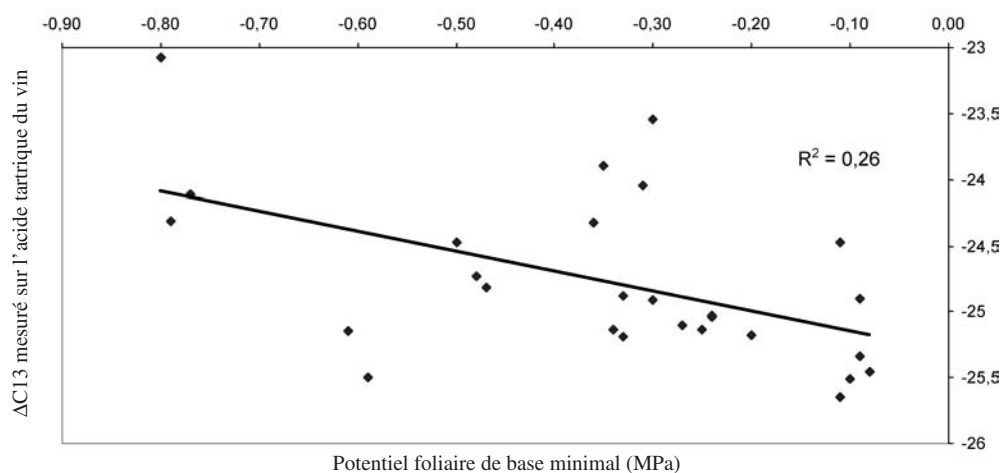


Fig. 6 - Corrélation entre le $\Delta C13$ mesuré sur l'acide tartrique du vin et le potentiel hydrique foliaire de base minimum mesuré au cours de la saison.

Correlation between wine tartrate $\Delta C13$ and minimum pre dawn leaf water potential.

par la vigne au cours de la période de maturation sur un grand nombre de parcelles. La mesure du rapport isotopique $^{13}C/^{12}C$ sur les sucres du moût à maturité permet une telle évaluation. Cette analyse est proposée par certains laboratoires en prestation de service, à un faible coût (environ 15 euros). Comme la plupart des parcelles viticoles sont échantillonnées au moins une fois avant la maturité pour déterminer la date des vendanges, cette détermination peut se faire dans la majorité des cas sans visite supplémentaire au vignoble. Lorsque la contenance de chaque cuve correspond à une parcelle (sélection parcellaire parfaite), il est même possible d'envisager le prélèvement de moût pour l'analyse au niveau de la cuve, ce qui éliminerait le problème de l'échantillonnage.

Le niveau de contrainte hydrique subie par la vigne dépend de la nature du sol (texture et profondeur), du climat (précipitations et ETP) et du matériel végétal (cépage et porte-greffe). Pour une année climatique donnée, les variations du rapport $\Delta C13$ permettent de différencier les sols suivant leur comportement hydrique, en relation avec leur Réserve Utile. Le classement des sols reste identique d'une année sur l'autre. Le rapport $\Delta C13$ peut donc rendre compte de l'effet « terroir ». Cette propriété est d'autant plus intéressante que les mesures peuvent facilement être mises en œuvre sur un grand nombre de parcelles, ce qui n'est pas le cas des techniques classiques telles que l'humidimètre à neutrons ou les potentiels hydriques. De la même manière, cet indicateur peut caractériser de façon globale le régime hydrique d'un millésime.

Le rapport $\Delta C13$ de l'acide tartrique du moût reflète également l'intensité de la contrainte hydrique pendant la période de maturation. Cependant, comme ce constituant est présent dans le moût à une plus faible concen-

tration que le sucre, la mesure de son $\Delta C13$ présente peu d'intérêt. Comme les sucres sont de loin les substances carbonées les plus abondantes dans le moût, les résultats de l'analyse de la discrimination isotopique réalisée directement sur le moût sont très proches des résultats de l'analyse réalisée sur les sucres purifiés (données non présentées).

Au cours de la fermentation alcoolique, les sucres sont transformés en éthanol. Le rapport $\Delta C13$, mesuré par RMN sur l'éthanol du vin, peut donner une indication sur la région de production et le millésime (DAY *et al.*, 1995) ou le cépage (YUNIANITA *et al.*, 1995). Cependant, de nombreux vins sont issus de moûts enrichis par chaptalisation ou ajout de moût concentré rectifié. Ces pratiques modifient le rapport $\Delta C13$ de l'alcool éthylique et peuvent ainsi fausser l'interprétation. L'acide tartrique n'est pas métabolisé par les micro organismes du vin. L'acide tartrique était donc une substance potentiellement intéressante pour évaluer la contrainte hydrique de la vigne à partir d'une détermination de son $\Delta C13$ réalisée sur le vin. Malheureusement, le rapport $\Delta C13$ de l'acide tartrique du vin ne répond pas très bien à la contrainte hydrique. Il est possible que, dans ce travail, l'acide tartrique n'ait pas été suffisamment purifié. Il suffit probablement d'une petite pollution par des composés phénoliques pour dégrader fortement la corrélation entre le $\Delta C13$ du tartrate et la contrainte hydrique, car la gamme de $\Delta C13$ observée sur les composés phénoliques est très différente par rapport à celui du tartrate. Par ailleurs, certains vins sont supplémentés en acide tartrique, notamment les vins de régions chaudes. L'ajout d'acide tartrique modifie le rapport $\Delta C13$ indépendamment du régime hydrique subi par la vigne.

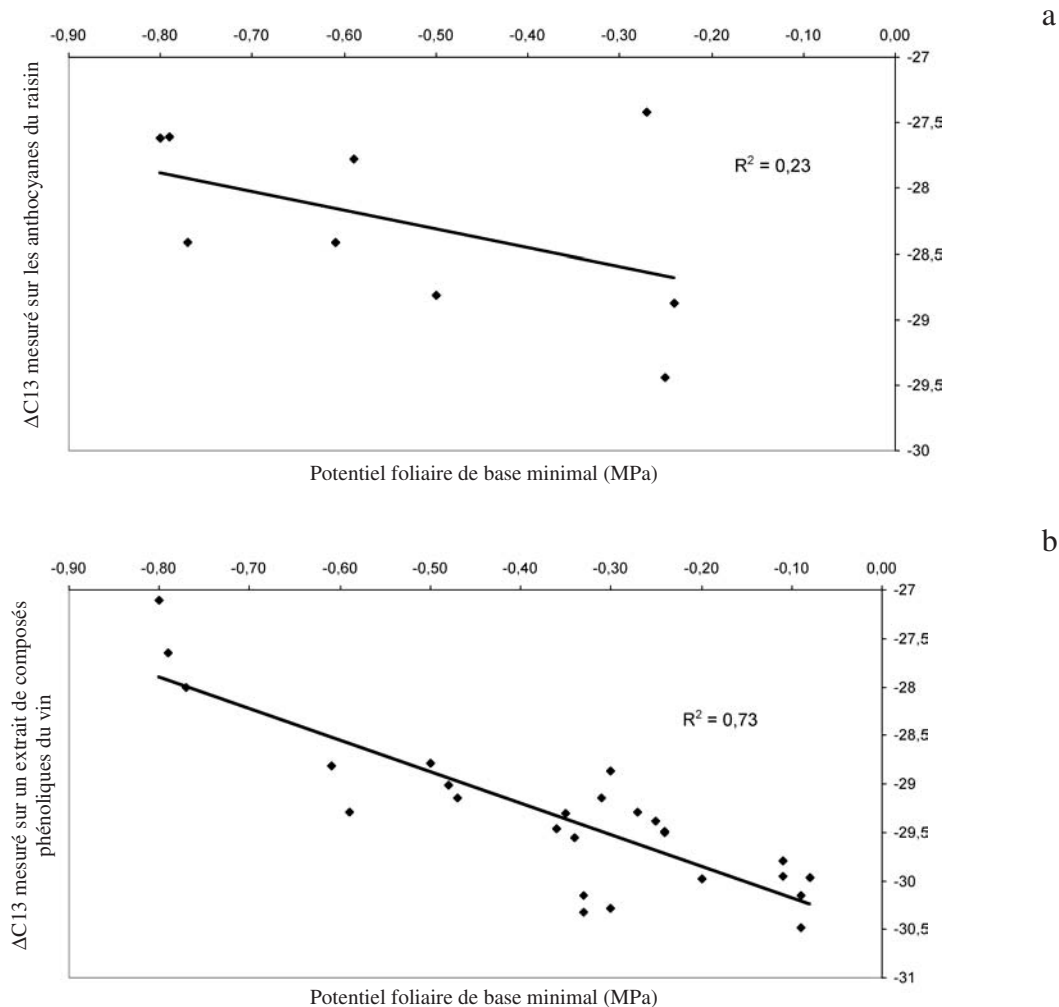


Fig. 7 - Corrélation entre le $\Delta C13$ mesuré sur les anthocyanes des raisins à maturité et le potentiel hydrique foliaire de base minimum mesuré au cours de la saison (a).

La même corrélation avec le $\Delta C13$ d'un extrait de composés phénoliques du vin (b).

Correlation between grape anthocyanin $\Delta C13$ and minimum pre dawn leaf water potential (a).

Correlation between $\Delta C13$ measured on wine phenolic compounds and minimum pre dawn leaf water potential (b).

Le rapport $\Delta C13$ des anthocyanes du raisin n'est pas bien corrélé aux potentiels foliaires de base. Il est possible que cette corrélation ait été affectée par une pollution des anthocyanes par les sucres. La gamme de $\Delta C13$ rencontrée dans ces deux substances carbonées est très différente, ce qui explique que la présence d'une petite fraction de sucres dans un extrait d'anthocyanes peut fortement dégrader la réponse. En revanche, le $\Delta C13$ mesuré sur les composés phénoliques du vin est très bien corrélé avec la contrainte hydrique. Cette propriété ouvre des perspectives très intéressantes. En effet, il est désormais possible d'envisager l'évaluation de la contrainte hydrique que la vigne a subi au cours de millésimes antérieurs par l'analyse du rapport isotopique $^{13}C/^{12}C$ sur une extrait de composés phénoliques purifiés du vin.

CONCLUSION

Le rapport isotopique $^{13}C/^{12}C$ ($\Delta C13$), mesuré sur les sucres ou l'acide tartrique du moût à maturité, constitue un indicateur global de la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la période de maturation. Le $\Delta C13$ mesuré sur un extrait de composés phénoliques du vin est également très bien corrélé au potentiel foliaire de base minimum mesuré au cours de la saison. En comparaison avec les indicateurs classiques du régime hydrique de la vigne, l'intérêt de cet indicateur réside dans sa grande accessibilité. En effet, de nombreuses observations peuvent être réalisées à un faible coût. Cette propriété fait de cette technique un outil de choix pour l'étude des terroirs viticoles.

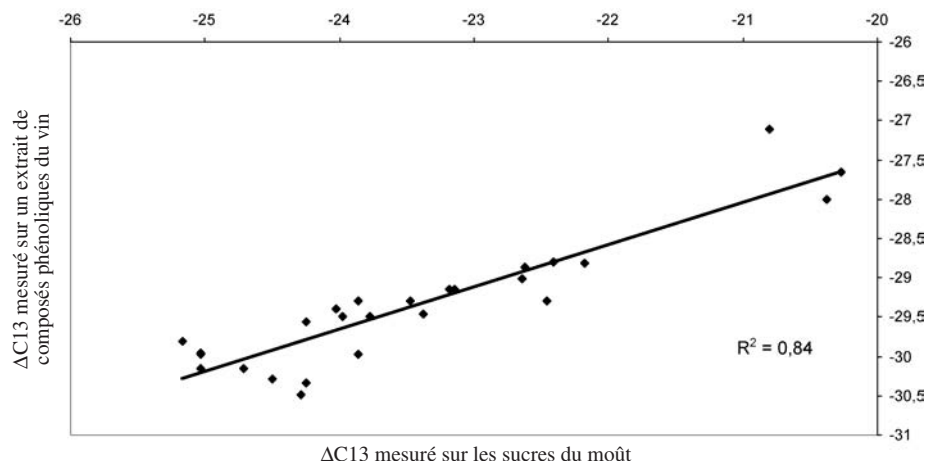


Fig. 8 - Corrélation entre le $\Delta C13$ mesuré sur un extrait de composés phénoliques du vin et le $\Delta C13$ mesuré sur les sucres du moût à maturité.

Correlation between $\Delta C13$ measured on wine phenolic compounds and must sugar $\Delta C13$ measured at ripeness.

Remerciements : Nous remercions vivement Mireille Barbaste et M. Vercauteren, qui ont purifié les échantillons des composés phénoliques et de l'acide tartrique à partir des vins. Nous remercions également Philippe Friant et Marie-Eve Jaeck pour leur participation à ce travail ainsi que Vincent Dupuch et André de la Bretesche de la Chambre d'Agriculture pour la réalisation des micro vinifications. Nous remercions Loïc Commagnac de l'unité Cartagère de l'ENITA de Bordeaux pour l'informatisation des cartes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AVICE J., OURRY A., LEMAIRE G. and BOUCAUD J., 1996. Nitrogen and carbon flows estimated by ^{15}N and ^{13}C pulse-chase labeling regrowth of alfalfa. *Plant Physiology*, **112**, 281-290.
- BEGG J. and TURNER N., 1970. Water potential gradients in field tobacco. *Plant Physiology*, **46**, 343-346.
- CHONE X., VAN LEEUWEN C., CHERY Ph. and RIBÉREAU-GAYON P., 2001a. Terroir influence on water status and nitrogen status of non irrigated Cabernet-Sauvignon (*Vitis vinifera*): vegetative development, must and wine composition. *S. Afr. J. Enol. Vitic.*, **22**, n°1, 8-15.
- CHONE X., VAN LEEUWEN C., DUBOURDIEU D. et GAUDILLÈRE J.-P., 2001b. Stem water potential is a sensitive indicator for grapevine water status. *Annals of Botany*, **87**, n°4, 477-483.
- DAY M., ZHANG B., MARTIN G., ASSELIN C. et MORLAT R., 1995. Essai de caractérisation du millésime et de la zone de production des vins à l'aide de traceurs métalliques et isotopiques. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **29**, n°2, 75-87.
- DUTEAU J., GUILLOUX M. and SEGUIN G., 1981. Influence des facteurs naturels sur la maturation du raisin, en 1979, à Pomerol et Saint-Émilion. *Connaissance Vigne Vin*, **15**, n°3, 1-27.
- ELHERINGER J., HALL A. and FARQUHAR G., 1993. *Stable isotopes and plant carbon-water relations*, Academic press, London.
- FARQUHAR G., VON-CAEMERER S. and BERRY J., 1980. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, **149**, 78-90.
- FARQUHAR G., EHLERINGER J. and HIBICK K., 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, **40**, 503-537.
- GAUDILLÈRE J.-P., VAN LEEUWEN C., OLLAT N., GOUTOULY F. and CHAMPAGNOL F., 1999. $^{13}C/^{12}C$. Discrimination measured in tartrate and sugars in mature grapevine berries. *Acta Hort.*, **493**, 63-68.
- HARDIE W. and CONSIDINE J., 1976. Response of grapes to water-deficit stress in particular stages of development. *Am. J. Enol. Vitic.*, **27**, n°2, 55-61.
- HSIAO T., 1973. Plants responses to water stress. *Annual Rev. Plant Physiology*, **24**, 519-570.
- KOUNDOURAS S., VAN LEEUWEN C., SEGUIN G. et GLORIES Y., 1999. Influence de l'alimentation en eau sur la croissance de la vigne, la maturation des raisins et les caractéristiques des vins en zone méditerranéenne (exemple de Némée, Grèce, cépage Saint-Georges, 1997). *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **33**, n°4, 149-160.
- LEBON E., SCHULTZ H. et DUMAS V., 1995. Application d'un modèle d'interception du rayonnement solaire par la vigne pour la simulation du bilan hydrique et de la photosynthèse à l'échelle du couvert : résultats préliminaires. *C.R. du GESCO*, 31-38.
- MATTHEWS M., ANDERSON M. and SCHULTZ H., 1987. Phenologic and growth responses to early and

- late season water deficits in Cabernet franc. *Vitis*, **26**, 147-160.
- MATTHEWS M. and ANDERSON M., 1988. Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: responses to seasonal water deficits. *Am. J. Enol. Vitic.*, **39**, n°4, 313-320.
- RIBÉREAU-GAYON G., 1966. Étude du métabolisme des glucides, des acides organiques et des acides aminés chez *Vitis vinifera*. Thèse de Doctorat ès Sciences physiques, Paris.
- RIOU C., 1994. Le déterminisme climatique de la maturation du raisin : application au zonage de la teneur en sucres dans la communauté européenne. Ed. Centre de recherche de la commission européenne. 322 p.
- RIOU Ch. et LEBON E., 2000. Application d'un modèle de bilan hydrique et de la mesure de la température du couvert au diagnostic du stress hydrique de la vigne à la parcelle. *Bull. O.I.V.*, **73**, 4, 755-764.
- SCHOLANDER P., HAMMEL H., EDDA D., BRADSTREET E. and HEMMINGSEN E., 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science*, **148**, 339-346.
- SEGUIN G., 1986. « Terroirs » and pedology of vinegrowing. *Experientia*, **42**, 861-873.
- SMART R. and ROBINSON M., 1991. *Sunlight into wine. A handbook for winegrape canopy management*. Ed. Winetitles, Adelaide, 88p.
- VALANCOGNE C. et NASR Z., 1993. A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In: *Water transport in plants under climatic stress*. International workshop, Firenze, 166-173. Cambridge University Press, Cambridge UK.
- VAN LEEUWEN C. et SEGUIN G., 1994. Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Émilion, 1990). *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **28**, n°2, 81-110.
- YUNIAN TA, ZHANG B., MARTIN G., ASSELIN C. et SCHAEFFER M., 1995. Essai de caractérisation du cépage des vins par analyse isotopique des éléments légers. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **29**, n°2, 89-98.

Reçu le 1^{er} août 2001
accepté pour publication le 16 novembre 2001
