

**ÉTUDE DU RÉGIME HYDRIQUE ET DE LA NUTRITION
AZOTÉE DE LA VIGNE
PAR DES INDICATEURS PHYSIOLOGIQUES
INFLUENCE SUR LE COMPORTEMENT DE LA VIGNE
ET LA MATURATION DU RAISIN
(*VITIS VINIFERA* L. CV MERLOT, 2000, BORDEAUX)**

**THE ASSESSMENT OF VINE WATER AND NITROGEN UPTAKE BY
MEANS OF PHYSIOLOGICAL INDICATORS
INFLUENCE ON VINE DEVELOPMENT AND BERRY POTENTIAL
(*VITIS VINIFERA* L. CV MERLOT, 2000, BORDEAUX)**

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

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, B.P. 81, 33883 Villenave d'Ornon, France

Résumé : Grâce à des indicateurs physiologiques, il est désormais possible de suivre avec pertinence et facilité l'alimentation en eau et en azote de la vigne en plein champ. Dans cette étude, le potentiel hydrique foliaire de base (ψ_B), le potentiel tige (ψ_T) et la discrimination isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\Delta\text{C}13$) ont permis d'évaluer le régime hydrique de la vigne. Le suivi de la nutrition azotée a été réalisé grâce à la mesure de la coloration des feuilles avec un appareil « N-tester » et grâce au dosage de l'azote assimilable du moût de raisin à maturité. Pour le cépage, la région et le millésime étudiés (Merlot, Bordeaux, 2000), le comportement de la vigne et la constitution du raisin ont surtout été influencés par l'alimentation en eau de la vigne. Sur des parcelles où le régime hydrique était similaire et peu limitant, une faible alimentation en azote de la vigne a permis d'obtenir plus facilement un raisin avec un fort potentiel œnologique.

Summary : Vine water and nitrogen uptake can be assessed by means of physiological indicators in field conditions. In this study, pre-dawn leaf water potential (ψ_B) and stem water potential (ψ_T) were used to indicate vine water status of *Vitis vinifera* L. cv. Merlot. Carbon isotope composition of grape sugar ($\Delta\text{C}13$) was used as an integrative indicator of vine water deficit during the ripening period. Must assimilable nitrogen and leaf blade colour intensity, were used to assess vine nitrogen status. All of the three indicators of vine water status allowed a clear differentiation of vine water uptake conditions in the ten experimental plots. The indicators of vine nitrogen status showed more ambiguous results. Must assimilable nitrogen content did not only vary with vine nitrogen uptake, but also with yield. Leaf colour was more easy to interpret. Vine development and berry composition were more influenced by water uptake conditions than by vine nitrogen status. In 2000, which was a dry vintage in Bordeaux, water stress induced early growth slackening and a small berry size. Grapes contained more sugar, anthocyanin and total phenolics and less malic acid when water availability was low. On plots where water uptake conditions were similar, low vine nitrogen status increased berry potential.

Mots clés : vigne, terroir, sol, déficit hydrique, nutrition azotée, potentiel de base, potentiel tige, discrimination isotopique, $\Delta\text{C}13$, azote assimilable, N-tester

Key words : vine, terroir, soil, water deficit, nitrogen uptake, pre-dawn leaf water potential, stem water potential, carbon isotope composition, $\Delta\text{C}13$, assimilable nitrogen, N-tester

INTRODUCTION

Il a été montré depuis longtemps que le comportement de la vigne et la constitution du raisin dépendent de la nature du sol (SEGUIN, 1975, 1986 ; DUTEAU *et al.*, 1981). Le sol influence fortement le régime hydrique de la vigne (à travers la réserve utile) et la nutrition minérale de la vigne. Parmi les éléments minéraux que la vigne prélève dans le sol, l'azote affecte le plus fortement son développement et la constitution du raisin. Même en l'absence de fertilisation azotée, l'alimentation en azote de la vigne varie en fonction de différents paramètres liés au type de sol : teneur en matière organique, rapport C/N de la matière organique, pH, aération, teneur en calcaire actif et humidité.

Récemment il a été montré que différents indicateurs physiologiques permettent un suivi pertinent du régime hydrique de la vigne (VAN LEEUWEN *et al.*, 2001a) et de sa nutrition azotée en plein champ. Pour le régime hydrique il s'agit du potentiel tige (CHONÉ *et al.*, 2001a) et du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans les produits primaires de la photosynthèse (VAN LEEUWEN *et al.*, 2001b ; GAUDILLERE *et al.*, 2002). Concernant l'azote, il a été montré que la teneur en azote assimilable du moût peut être un indicateur de l'alimentation en azote de la vigne (VAN LEEUWEN *et al.*, 2000). L'intensité de la coloration verte du feuillage varie avec le statut azoté de la vigne. Celle-ci peut être évaluée au vignoble par la détermination de l'indice chlorophyllien à l'aide d'un appareil appelé « N-tester » (société Norsk-Hydro, Nanterre, France) (SPRING, 1999 ; SPRING et ZUFFEREY, 2000).

L'objectif de ce travail est de préciser l'effet du régime hydrique et de l'alimentation en azote de la vigne sur son comportement et sur la maturation du raisin en faisant appel à ces indicateurs physiologiques, dont certains n'ont jamais été utilisés dans une étude de terroir. L'étude a été réalisée dans cinq crus, situés dans les principales régions de production des grands vins rouges de Bordeaux : Haut-Médoc, Pessac-Léognan, Saint-Émilion et Pomerol. Afin de couvrir une grande variabilité de types de sol, dans chaque cru une parcelle qualitative, produisant chaque année du grand vin, a été étudiée, et une autre parcelle produisant plus régulièrement du second vin.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

I- PARCELLES EXPERIMENTALES

Au sein de chaque parcelle agronomique retenue, nous avons sélectionné une micro-parcelle de 150 pieds. Sur chaque micro-parcelle, une fosse pédologique a été ouverte afin de connaître avec précision la nature du sol. Chaque horizon a été décrit et dans chaque horizon un échantillon de terre a été prélevé et analysé. Les sols rencontrés, sur l'ensemble de l'échantillon des micro-parcelles, sont souvent très distincts et couvrent ainsi une grande variabilité parmi les sols rencontrés dans le Bordelais (tableau I).

II- CLIMATOLOGIE DU MILLÉSIME 2000

Les données climatiques figurant sur la figure 1) ont été collectées sur une station basée sur le secteur de Saint-Émilion. Les moyennes représentées sont calculées sur 25 ans (1955-1979).

Tableau I - Caractéristiques des parcelles étudiées
Characteristics of the studied plots.

Numéro parcelle	Cépage / porte greffe	Année de plantation	Densité de plantation	Type de sol	Nom usuel de type de sol
1A	Merlot / Nd	1957	6300	PLANOSOL sédimorphe superficiel	Sol très argileux
1B	Merlot / 3309 C	1981	6500	BRUNISOL gravelo-sableux	Sol graveleux
2A	Merlot / RGM	1987	6600	PLANOSOL sédimorphe	Sable sur argile lourde
2B	Merlot / RGM	1987	6600	REDOXISOL sablo-argileux	Sable sur sable argileux
3A	Merlot / 41 B	1920	6300	CALCOSOL superficiel	Sol argilo-calcaire sur calcaire dur
3B	Merlot / Nd	1920	5500	COLLUVIOSOL calcaire sur REDOXISOL	Sol épais sur colluvions de bas de pente
4A	Merlot / 420A	1981	8000	PEYROSOL peu évolué	Sol très graveleux
4B	Merlot / 420A	1982	8000	BRUNISOL sablograveleux	Sol sablo-graveleux
7A	Merlot / RGM	1985	7700	PEYROSOL concrétionné localement podzolisé	Sol très graveleux noir concrétionné
7B	Merlot / RGM	1984	7700	NEOLUVISOL sableux	Sol très sableux

(Nd : non déterminé - not determined)

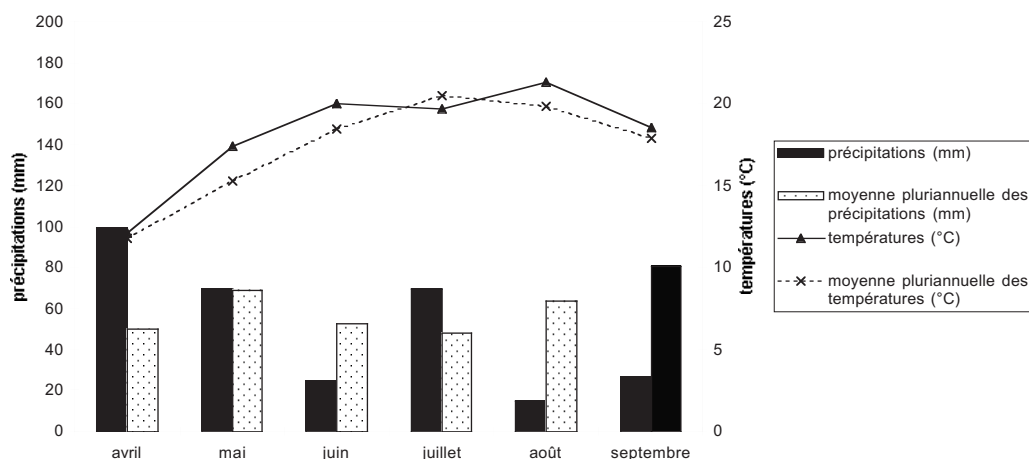


Fig. 1 - Températures et précipitations à Saint-Émilion en 2000 ; comparaison avec les valeurs normales (1955-1979).
Temperature and rainfall in Saint-Emilion, 2000 ; comparison with average values (1955-1979).

Le climat durant la saison végétative de la vigne se caractérise par des températures en général supérieures à la moyenne. Seules les températures du mois de juillet sont inférieures à la moyenne. En ce qui concerne la répartition des pluies, le mois de juillet a été assez pluvieux, 70 mm contre 48 mm en moyenne. En revanche, les mois de juin, d'août et de septembre ont été particulièrement peu pluvieux, et le millésime peut globalement être qualifié comme sec. Par conséquent, la maturation du raisin en 2000 s'est réalisée dans d'excellentes conditions.

III - ALIMENTATION EN EAU DE LA VIGNE

Au cours de la saison le régime hydrique de la vigne a été suivi à l'aide d'une chambre à pression (SCHOLANDER *et al.*, 1965) de juin jusqu'aux vendanges. Deux potentiels hydriques ont été mesurés :

- Le potentiel foliaire de base (Ψ_B) qui reflète l'état hydrique de la plante en fin de nuit quand les flux de sève sont pratiquement nuls. Cette mesure nous renseigne sur l'état hydrique du sol dans l'environnement des racines, puisqu'en fin de nuit l'état hydrique de la plante est considéré en équilibre avec l'état hydrique du sol (KATERJI et HALLAIRE, 1984).

- Le potentiel tige (Ψ_T) qui reflète l'état hydrique moyen de la plante entière. Il est mesuré aux heures les plus chaudes de la journée sur une feuille qui ne transpire pas, grâce à un ensachage préalable. Le potentiel hydrique de la feuille s'équilibre avec celui du xylème du rameau et intègre donc l'état hydrique de la plante entière. Le potentiel tige dépend de la transpiration globale de la plante, de la disponibilité de l'eau dans le sol et de la conductivité hydraulique du sol à de l'interface sol/racines (CHONE *et al.*, 2001a).

Après les vendanges, le rapport des isotopes $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (appelé $\Delta\text{C}13$) a été mesuré sur les sucres du moût. Il s'agit d'un indicateur global de la contrainte hydrique de la vigne lors de la période de synthèse des sucres, c'est-à-dire de la véraison à maturité. En effet, la régulation stomatique (lors des périodes de contrainte hydrique) limite la discrimination isotopique du carbone atmosphérique. Ainsi le ratio $\Delta\text{C}13$ du carbone incorporé lors de la photosynthèse n'est pas stable comme dans l'atmosphère, mais fluctue en fonction de la régulation stomatique. Cette régulation stomatique dépend fortement de l'état hydrique de la plante ; ainsi le $\Delta\text{C}13$ des produits de la photosynthèse, et notamment des sucres, devient un indicateur moyen ou global du régime hydrique durant la période de synthèse des sucres. Cette méthode présente l'avantage d'être réalisée sur un échantillon de moût avant vendange (VAN LEEUWEN *et al.*, 2001b ; GAUDILLÈRE *et al.*, 2002).

IV- NUTRITION AZOTÉE

L'alimentation en azote de la vigne a également été suivie à l'aide de deux techniques :

- Le dosage de l'azote assimilable du moût de raisin, réalisé par formol titration (méthode SORÈNSEN) permet de renseigner sur le niveau de la nutrition azotée de la vigne en été (VAN LEEUWEN *et al.*, 2000). À partir de la véraison, un prélèvement de raisin est réalisé chaque semaine sur lequel est déterminé la teneur en azote assimilable.

- Pour apprécier l'alimentation en azote de la vigne, le viticulteur recourt bien souvent à une observation de la couleur du feuillage. Une vigne plutôt carencée en azote présente une coloration verte peu intense et vice-versa ; cette observation n'en demeure pas moins subjective. La société Norsk Hydro a développé, depuis

Tableau II - Seuil de signification d'un coefficient de corrélation au risque de 5 %, 1 % et 0,1 % avec n=10.

Signification of a correlation coefficient
at a risk of 5 %, 1 % et 0,1 % with n=10.

Corrélations significatives au seuil de	0,05	0,01	0,001
Si r >	0,632	0,764	0,872
Indication	*	**	***

Tableau III - Corrélation entre les valeurs de $\Delta C13$ mesurées sur le moût à maturité

et le potentiel foliaire de base et le potentiel tige mesurés à la mi-véraison et à maturité (n = 10).

Correlations between $\Delta C13$ values measured on grape sugar at ripeness and pre dawn leaf water potential and stem water potential values measured at 50 % veraison and at ripeness (n = 10).

	ψT_{mi-ver}	ψT_{mat}	ψB_{mi-ver}	ψB_{mat}
$\Delta C13$	-0,92***	-0,93***	-0,88***	-0,93***

quelques années, un système portatif de mesure d'un indice chlorophyllien (N-tester) afin de corriger les apports azotés sur céréales. Cet outil est en cours de validation pour évaluer le statut azoté de la vigne (SPRING, 1999 ; SPRING et ZUFFEREY, 2000). Dans notre étude, l'indice chlorophyllien N-tester est mesuré de manière hebdomadaire de juin aux vendanges.

V - COMPORTEMENT VÉGÉTATIF DE LA VIGNE

Les différents stades phénologiques de la vigne sont notés : mi-débourrement, mi-floraison, mi-véraison. Un suivi de la croissance de la vigne est opéré. La mesure d'allongement d'un rameau est effectuée sur le dernier rameau du long bois d'un cep de vigne. Ce dernier est couché sur le fil du bas et attaché réguliè-

rement de manière à ne pas être rogné. Sur chaque micro-parcelle 30 rameaux ont été suivis. Cette donnée importante permet de noter la dynamique de croissance et de noter également la date d'arrêt de croissance des différentes micro-parcelles étudiées.

Deux informations supplémentaires sont également relevées : le rendement avant et après éclaircissage de chaque parcelle, et le poids des bois de taille au cours de l'hiver suivant.

VI - SUIVI DE MATURATION

Un suivi de maturation est réalisé de la véraison jusqu'aux vendanges, en mesurant les sucres réducteurs, l'acidité totale, l'acide malique, le potassium, les anthocyanes, l'Indice des Polyphénols Totaux (IPT), et le poids d'une baie. Les anthocyanes ont été déterminées à partir d'un échantillon de 100 baies, dont les pellicules ont été séparées. Les pellicules ont été broyées et le broyat a macéré pendant 2 heures sous agitation dans une solution synthétique à pH 3,6. Après centrifugation, les anthocyanes ont été dosées sur la solution d'extraction par Chromatographie Liquide Haute Pression (CLHP).

VII - ANALYSE STATISTIQUE

Les comparaisons statistiques ont été réalisées à l'aide des logiciels Excel et Stat box Pro. La plupart des résultats apparaissent sous forme de coefficients de corrélation (r). Le nombre d'individus est fixe (n = 10) pour l'ensemble des résultats. Ces corrélations sont significatives au seuil de 5 %, 1 % et 0,1 % dans les conditions indiquées dans le tableau II.

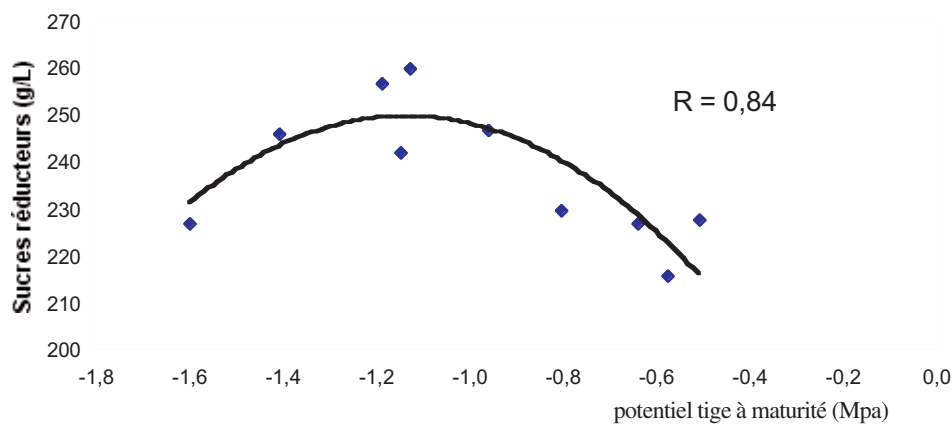


Fig. 2 - Corrélation entre l'intensité de la contrainte hydrique (évaluée par le potentiel tige à maturité) et la concentration en sucres réducteurs.

Correlation between the intensity of vine water stress
(assessed by measurement of stem water potential at ripeness) and berry sugar content

RÉSULTATS ET DISCUSSION

I - COMPARAISON DU $\Delta C13$, DU POTENTIEL TIGE ET DU POTENTIEL FOLIAIRE DE BASE COMME INDICATEURS DE CONTRAINTE HYDRIQUE

Trois indicateurs du régime hydrique de la vigne ont été comparés : la discrimination isotopique du carbone $^{13}C/^{12}C$ (appelée $\Delta C13$), le potentiel tige et le potentiel foliaire de base. Pour le traitement statistique, seules les valeurs des potentiels obtenues à la mi-véraison et au moment des vendanges ont été utilisés.

Les valeurs de $\Delta C13$ sont très fortement corrélées avec les valeurs des potentiels : les coefficients de corrélation sont compris entre -0,88 et -0,93 (tableau III ; n = 10)

Ces résultats confirment que ces trois indicateurs permettent tous d'évaluer avec pertinence la contrainte hydrique de la vigne sur les parcelles étudiées, au cours du millésime 2000.

II - INCIDENCE DU RÉGIME HYDRIQUE DE LA VIGNE SUR SON COMPORTEMENT ET SUR LA CONSTITUTION DES RAISINS À MATURITÉ

Les différents indicateurs du régime hydrique de la vigne ont été corrélés avec quelques constituants du raisin et avec deux composantes du rendement (tableau IV).

Ces résultats confirment l'importance du régime hydrique sur le potentiel œnologique du raisin avec un objectif de production de vin rouge de garde. Plus le régime hydrique est fortement limitant, plus les raisins sont riches en composés phénoliques et pauvres en acide malique. En faisant des régressions linéaires entre les indicateurs de contrainte hydrique et la teneur en sucres du raisin à maturité, les corrélations sont plus lâches (tableau IV). La relation entre sucres et contrainte hydrique est d'ordre polynomiale (fig. 2). Les teneurs en sucres sont les plus élevées pour une contrainte hydrique modérée (-0,9 à -1,3 MPa en potentiel tige) ; elles sont plus faibles aussi bien en l'absence de

Tableau IV - Corrélation entre les indicateurs du régime hydrique de la vigne, la constitution du raisin à maturité et deux composantes du rendement (n = 10)

Correlations between physiological indicators of vine water status, berry composition at ripeness and two yield components (n = 10).

	ψT_{mi-ver}	ψT_{mat}	ψB_{mi-ver}	ψB_{mat}	$\Delta C13$
Sucres réducteurs	-0,39	-0,49	-0,21	-0,16	0,23
Anthocyanes	-0,91***	-0,88***	-0,86**	-0,92***	0,96***
IPT	-0,89***	-0,88***	-0,86**	-0,90***	0,96***
Acide malique	0,78**	0,73*	0,36	0,55	-0,65*
Poids d'une baie	0,92***	0,87**	0,60	0,79**	-0,83**
Rendement après éclaircissage	0,90***	0,81**	0,62	0,69*	-0,79**

Tableau V - Corrélations entre le $\Delta C13$, le potentiel tige à la mi-véraison, la précocité du cycle reproducteur, la date de l'arrêt de croissance, deux composantes du rendement et la constitution du raisin à maturité (n = 10)

Correlations between stem water potential at 50% veraison and $\Delta C13$ values measured on grape sugar at ripeness and precociousness of veraison, date of growth slackening, two yield components and berry composition at ripeness (n = 10)

	Date mi-véraison	Date arrêt de croissance	Poids des baies	Rendement après éclaircissage
$\Delta C13$	-0,04	-0,79**	-0,83**	-0,79**
ψT_{mi-ver}	0,19	0,87**	0,92***	0,90***
Sucres réducteurs	-0,37	-0,35	-0,46	-0,38
Anthocyanes	0,11	-0,90***	-0,90***	-0,82**
IPT	0,12	-0,88***	-0,88***	-0,81**
Acidité totale	-0,40	0,55	0,67*	0,78**
Acide malique	-0,02	0,89***	0,94***	0,86**
K^+	-0,10	-0,58	-0,64*	-0,43
Date mi-véraison		-0,06	-0,02	0,14
Date arrêt de croissance	-0,06		0,96***	0,79**
Poids des baies	-0,02	0,96***		0,90***
Rendement après éclaircissage	0,14	0,79**	0,90***	

contrainte hydrique qu'en présence de forte contrainte hydrique.

Les coefficients de corrélation obtenus pour les différents variables mesurés sont plus élevés avec le potentiel tige et le $\Delta C13$ qu'avec le potentiel foliaire de base. Cette observation indique probablement une meilleure estimation de l'intensité de la contrainte hydrique avec le potentiel tige et avec le $\Delta C13$ qu'avec le potentiel foliaire de base. Il faut également souligner que les coefficients de corrélation obtenus avec le potentiel tige mesuré à la mi-véraison sont aussi bons et souvent même meilleurs que ceux obtenus avec le potentiel tige à maturité. Au cours d'une année sèche comme 2000, l'influence de la contrainte hydrique sur le potentiel œnologique du raisin s'exerce précocement, en grande partie entre la nouaison et la véraison.

Afin de mieux comprendre l'interaction entre le régime hydrique, le comportement de la vigne et la constitution du raisin, des corrélations ont été établies entre les indicateurs de régime hydrique les plus pertinents ($\Delta C13$ et potentiel tige à la mi-véraison), la précocité du cycle reproducteur, la date de l'arrêt de croissance, deux composantes du rendement et la constitution du raisin à maturité (tableau V).

Sur les parcelles étudiées, la mi-véraison a été notée entre le 28 juillet et le 4 août 2000. La précocité de la mi-véraison n'est corrélée ni au régime hydrique, ni à la constitution du raisin à maturité. Cet état de fait s'explique entre autres par le faible écart entre dates de mi-véraison observées sur les parcelles étudiées. Par ailleurs, l'état de maturité du cépage Merlot est rarement un facteur limitant de la qualité sous le climat bordelais.

La date de l'arrêt de croissance s'est étalée, dans cette étude, du 8 août 2000 au 2 octobre 2000. La précocité de l'arrêt de croissance dépend fortement du régime hydrique (corrélation $r = 0,87$ avec le potentiel tige). Plus l'arrêt de croissance est précoce, plus les raisins sont riches en anthocyanes ($r = -0,90$) et en composés phénoliques ($r = -0,88$) et pauvres en acide malique ($r = 0,89$). La corrélation entre la date de l'arrêt de croissance et la teneur en sucres des raisins est plus lâche ($r = -0,35$).

Le poids des baies est très fortement corrélé avec l'indicateur du régime hydrique ($r = 0,92$). Les petites baies sont riches en anthocyanes et en composés phénoliques et, dans une moindre mesure, en sucres réducteurs (tableau V). La corrélation entre le poids des baies et la teneur en anthocyanes exprime ici uniquement

Tableau VI - Analyse de variance de la régression multiple entre la teneur en azote assimilable des moûts (NMOUT) et le rendement (RDT), la contrainte hydrique ($\Delta C13$) et l'indice N-tester (NTEST) des feuilles à la véraison. $NMOUT = 1,23 (NTEST) - 45,0 (RDT) + 15,7 \Delta C13$

Analysis of variance of the multiple regression between must assimilable nitrogen content (NMOUT) and the yield (RDT), water stress ($\Delta C13$) and N-tester values (NTEST). $NMOUT = 1,23 (NTEST) - 45,0 (RDT) + 15,7 \Delta C13$

	Somme des carrés des écarts	Degrés de liberté	F	Probabilité
Régression multiple	1437814	3	39	< %
Résidu	8605	7		

Tableau VII - Teneur en azote assimilable du moût à maturité, valeurs N-tester, $\Delta 13C$ et rendement potentiel avant éclaircissage

Must assimilable nitrogen content at ripeness, N-tester values, $\Delta 13C$ and yield potential before grape thinning

Parcelle	N assimilable (mg/l)	Indice N tester	$\Delta 13C$	Rendement avant éclaircissage kg/cep
1A	114	468	-22.9	1.39
1B	235	490	-21.6	1.89
2A	70	499	-23.3	3.11
2B	136	470	-23.4	2.41
3A	71	459	-22.9	2.95
3B	77	475	-24.6	2.65
4A	63	446	-24.0	2.59
4B	134	525	-24.6	3.06
7A	142	532	-23.6	2.38
7B	88	526	-24.3	3.89

Tableau VIII - Corrélations entre la valeur du N-tester à maturité et la précocité du cycle reproducteur, la date de l'arrêt de croissance, deux composantes du rendement et la constitution du raisin à maturité (n = 10).

Correlations between N-tester values at ripeness and the precociousness of veraison, the date of growth slackening, two yield components and berry composition at ripeness (n = 10).

	N-tester à maturité
Date mi-véraison	-0,25
Sucres réducteurs	-0,56
Anthocyanes	-0,34
IPT	-0,37
Acidité totale	0,57
Acide malique	0,72*
K ⁺	-0,03
Poids des baies	0,55
Date de l'arrêt de croissance	0,54
Rendement après éclaircissage	0,46

une plus grande richesse des pellicules en matière colorante par unité de surface et fait abstraction de l'amélioration du rapport pellicule / jus, qui s'y ajoute. En effet, la méthode de dosage des anthocyanes utilisée est basée sur l'extraction des pellicules des 100 baies dans une quantité fixe de solution d'extraction. Les grosses baies contiennent davantage d'acide malique (tableau V). Ces résultats sont en accord avec VAN LEEUWEN et SEGUIN (1994).

Le rendement dépend également du régime hydrique. Un fort rendement se traduit par une faible

teneur en anthocyanes et en composés phénoliques et une teneur élevée en acide malique. Cette relation entre rendement et régime hydrique est surprenante, car il s'agit de rendements après éclaircissage. Cependant, dans les crus étudiés l'objectif de l'éclaircissage est généralement une diminution du rendement en proportion. Ainsi, l'éclaircissage ne modifie pas fondamentalement la hiérarchie du rendement entre les parcelles étudiées, même si la quantité de grappes éliminées n'est pas négligeable.

L'imbrication entre le régime hydrique, le comportement de la vigne et la constitution du raisin peut être expliquée de la façon suivante. Un régime hydrique limitant provoque un arrêt de croissance précoce et réduit le poids des baies et le rendement. Lorsque les baies sont petites, lorsque le rendement est modéré et lorsque la vigne ne pousse plus pendant la période de maturation, les conditions sont réunies pour obtenir un raisin de qualité. Un arrêt de croissance précoce limite également le développement de la surface foliaire secondaire et améliore ainsi le micro climat lumineux et thermique des grappes. Ces conditions sont propices à la maturation du raisin.

III - ÉVALUATION DU STATUT AZOTÉ DE LA VIGNE

L'alimentation en azote de la vigne a été évaluée par des mesures de l'indice chlorophyllien (N-Tester, Hydro Agri ; SPRING, 1999 ; VAN LEEUWEN *et al.*, 2000) et la teneur en azote assimilable des moûts. Ces deux évaluations ne sont pas corrélées entre elles (fig. 3). Cette absence de liaison entre ces deux indicateurs est expliquée par la relativement faible amplitude de varia-

Tableau IX - Constitution du raisin à maturité, rendement, date d'arrêt de croissance et état hydrique à maturité

Grape composition at ripeness, yield, date of growth slackening and water status at ripeness

	N mat	N testmat	SR	antho	IPT	AT	MAL	K	Pdb	arrêt	Y (ecl)	ψTmat
1A	114	468	246	2035	70	2,9	1,4	1473	1,21	229	1119	-1,41
1B	235	490	227	2549	92	3,0	1,5	1578	1,19	221	964	-1,60
2A	70	499	260	1712	59	3,5	1,8	1655	1,48	246	1888	-1,13
2B	136	470	257	1728	60	3,2	1,6	1670	1,40	248	1428	-1,19
3A	71	459	242	1949	70	2,9	1,4	1426	1,39	245	1289	-1,15
3B	77	475	228	1553	54	3,0	1,7	1298	1,54	248	1863	-0,51
4A	63	446	247	1487	54	3,1	2,0	1117	1,67	261	1824	-0,96
4B	134	525	227	1247	43	3,6	2,4	1204	1,84	270	2192	-0,64
7A	142	532	230	1601	55	3,0	2,2	1358	1,64	270	1438	-0,80
7B	88	526	216	1391	48	3,5	2,8	1361	1,91	276	2769	-0,58

(Nmat : teneur en azote assimilable à maturité (mg N / L) ; Ntestmat : valeurs de Ntester à maturité ; SR : sucres réducteurs (g/L) ; Antho : anthocyanes (mg/L) ; IPT : indice des polyphénols totaux ; AT : acidité totale (g H₂SO₄/L) ; MAL : acide malique (g/L) ; K : potassium (mg/L) ; Pdb : poids moyen d'une baie (g) ; Arrêt : date d'arrêt de croissance en jours Julien ; Y (ecl) : rendement éclairci (g) ; ψTmat : potentiel tige à maturité (Mpa)).

(Nmat : must assimilable nitrogen content at ripeness (mg N / l) ; Ntestmat : N-tester values at ripeness ; SR : must sugar content at ripeness (g/L) ; Antho : anthocyanin (mg/L) ; IPT : total phenolics ; AT : total acidity (g H₂SO₄/L) ; MAL : malic acid (g/L) ; K : potassium (mg/L) ; Pdb : berry weight (g) ; date of growth slackening in Julien days ; Y (ecl) : yield after grape thinning (g) ; ψTmat : stem water potential at ripeness (Mpa)).

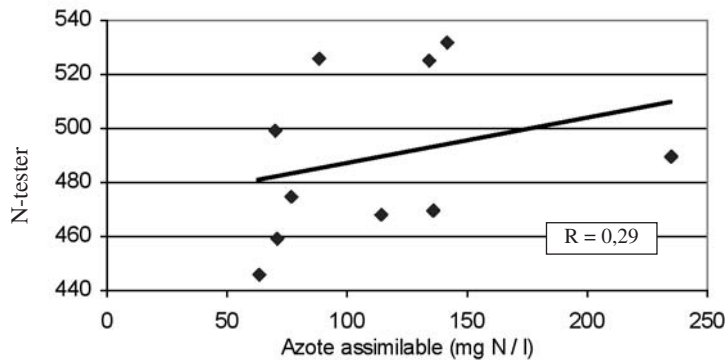


Fig. 3 - Teneur en azote assimilable du moût à maturité et la valeur du N-tester à maturité (n = 10)

Must assimilable nitrogen content at ripeness and N-tester values at ripeness (n = 10)

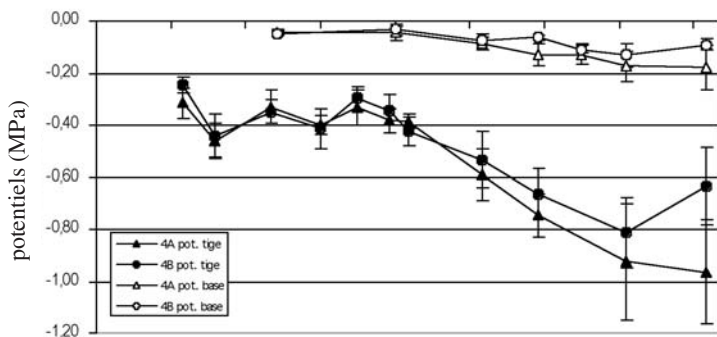


Fig. 4 - Évolution du potentiel tige et du potentiel foliaire de base au cours de l'été 2000 sur les parcelles 4A et 4B

Les barres d'erreur indiquent en plus ou en moins l'écart type.

Seasonal stem water potential and pre dawn leaf water potential in 2000 on plots 4A and 4B
Error bars indicate standard deviation.

tion de l'indice chlorophyllien (440 à 540) comparé aux variations rapportées par les auteurs qui ont réalisé cette observation (200 à 450, SPRING, 1999). En revanche, la teneur en azote assimilable des moûts montre une amplitude de variation importante (50 à 250 mg N/l). L'alimentation azotée des vignes était donc très différenciée pendant la maturation, période pendant laquelle les acides aminés assimilables sont accumulés avec les sucres dans les raisins (RODRIGUES-LOVELLE and GAUDILLÈRE, 2002). Cette différenciation est créée par les différences de fertilité liées à des teneurs en matière organique des sols des parcelles (en absence de fertilisation minérale) et la minéralisation de l'azote en été liée à la teneur en eau des sols. Par ailleurs, les parcelles à très fort rendement présentent des moûts pauvres en azote. Il est probable que l'azote assimilé par la vigne pourra être dilué dans une récolte importante.

La fertilité des sols est reflétée par les indices N-tester qui mesurent l'azote foliaire établi au début du cycle de végétation. Une régression multiple entre l'azote assimilable des moûts et les trois variables explicatives (l'indice N-tester, le rendement et le régime hydrique en été) permet de hiérarchiser les effets de ces trois variables (tableau VI). Les trois variables, l'indice N-tester, la discrimination isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et le rendement, contribuent significativement à la variabilité de l'azote des moûts. Ces trois variables expliquent 94 % de la variabilité dans un modèle linéaire généralisé sans facteur constant (I).

$$\text{NMOUT} = 1,23 (\text{NTEST}) - 45,0 (\text{RDT}) + 15,7 \Delta\text{C13} \quad (\text{I})$$

Les parcelles 2A, 4B, 7A et 7B peuvent être classées comme fertiles (indice N-tester élevé, tableau VII). Les parcelles qui produisent des raisins pauvres en azote sont soit peu fertiles (4A) soit très productives (parcelles 2A et 7B). L'analyse statistique indique en outre que l'azote des moûts de la parcelle 1B n'est pas homogène avec l'ensemble des données issues du réseau de parcelles (outlier). Cette parcelle est caractérisée par une fertilité élevée, une productivité faible (éclaircissage) et un stress hydrique très accentué. Cette combinaison de variables peut expliquer l'extrême richesse en azote des moûts.

IV - INCIDENCE DE L'ALIMENTATION EN AZOTE DE LA VIGNE SUR SON COMPORTEMENT ET SUR LA CONSTITUTION DES RAISINS À MATURITÉ

Les deux indicateurs de la nutrition azotée de la vigne mis en œuvre dans cette étude, présentent des corrélations faibles avec les variables de fonctionnement de la vigne et la constitution du raisin à maturité. Ces corrélations sont un peu plus élevées pour le N-tester que pour l'azote assimilable du moût, mais restent le plus souvent non significatives (tableau VIII).

Une forte alimentation en azote a tendance à retarder l'arrêt de croissance et à augmenter le poids des baies. Les raisins sont plus pauvres en sucres réducteurs et plus riches en acide malique. Cependant, les corrélations sont faibles et, dans les conditions de cette étude (année sèche) l'effet de l'azote sur le comportement de la vigne est beaucoup plus faible que celui de l'alimentation en eau.

Une analyse plus fine, parcelle par parcelle, permet de préciser le rôle respectif du régime hydrique et de l'alimentation en azote de la vigne. La parcelle 1B a subi la plus forte contrainte hydrique de toutes les parcelles étudiées (potentiel foliaire de base minimum de -0,97 MPa ; potentiel tige minimum de -1,60 MPa) ; son niveau de nutrition azotée était plutôt élevé (teneur

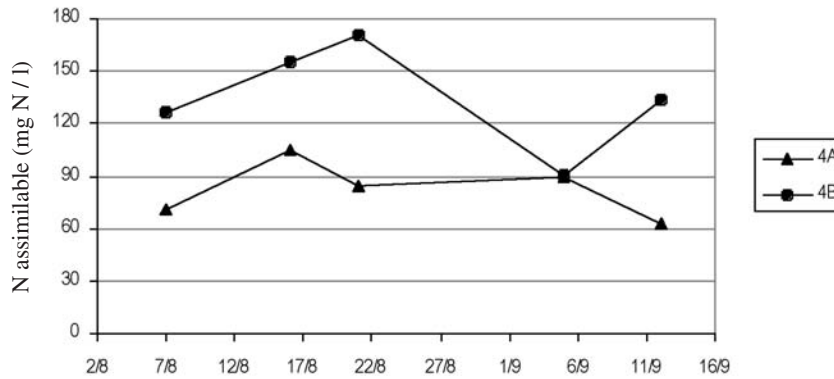


Fig. 5a - Évolution de la teneur en azote assimilable du moût des raisins des parcelles 4A et 4B au cours de la période de maturation de l'année 2000
Must assimilable nitrogen content on plots 4A and 4B during grape ripening in 2000

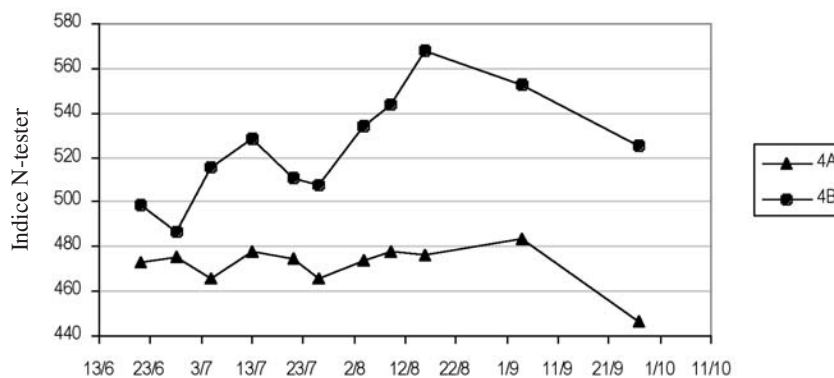


Fig. 5b - Évolution de l'indice N-tester, mesuré sur les parcelles 4A et 4B, au cours de l'été 2000
Seasonal variations of N-tester values on plot 4A and 4B in 2000

en azote assimilable à maturité = 235 mg N/L ; valeur N-tester à maturité = 490). Le potentiel œnologique de cette parcelle était très élevé (tableau IX).

Sur cette parcelle il semble donc que l'effet positif de la contrainte hydrique l'a emporté sur l'effet négatif d'une alimentation en azote plutôt forte pour un vignoble de cru. On peut penser que la forte nutrition azotée a contribué à accentuer le déficit hydrique. En effet, elle a favorisé le développement de la surface foliaire secondaire, augmentant d'autant la surface évaporante du feuillage. Celle-ci a provoqué un épuisement rapide des faibles réserves en eau présentes dans ce sol, qui contient un fort taux d'éléments grossiers. Une défoliation assez importante est alors survenue mi-août. Il a fallu éclaircir une seconde fois de manière à garder un rapport surface foliaire/charge en fruit satisfaisant pour une bonne maturation.

Le couple de parcelles 4A et 4B présente également un cas intéressant, car leur régime hydrique est très proche (fig. 4). Ces deux parcelles se différencient

essentiellement par leur niveau d'alimentation en azote, qui est plus forte sur la parcelle 4B, comme en témoigne l'évolution des teneurs en azote assimilable au cours de la maturation (fig. 5a) et l'évolution de l'indice N-tester de juin à septembre (fig. 5b).

L'arrêt de croissance est un peu plus précoce sur la parcelle 4A et le poids des baies y est plus faible, comparé à la parcelle 4B (tableau IX). Sur 4A les raisins sont plus riches en sucres réducteurs, en anthocyanes et en composés phénoliques et plus pauvres en acide malique. A régime hydrique équivalent et peu limitant, la plus faible alimentation en azote sur la parcelle 4A a permis d'obtenir des raisins de plus fort potentiel œnologique. Ces observations confirment celles de CHONE *et al.* (2001b), qui avaient signalé une forte augmentation du potentiel œnologique de raisins rouges sur les parcelles carencées en azote, au cours d'un millésime pluvieux et peu propice à l'installation d'une contrainte hydrique.

CONCLUSION

Au cours de cette étude, différents indicateurs physiologiques du régime hydrique et du statut azoté de la vigne ont été comparés. Ces indicateurs avaient été choisis pour la facilité de leur mise en œuvre. Certains sont récents et n'avaient jamais été utilisés dans une étude de terroir auparavant.

Tous les indicateurs de régime hydrique utilisés ont permis d'évaluer avec précision le comportement hydrique de la vigne sur les 10 parcelles expérimentales. La discrimination isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, mesurée sur les sucres du moût (appelé $\Delta\text{C}13$), et le potentiel tige sont fortement corrélés à des constituants du raisin, tels que la teneur en sucres, en anthocyanes et en acide malique

L'interprétation des résultats des indicateurs de la nutrition azotée a été moins aisée. La teneur en azote assimilable du moût à maturité varie avec l'alimentation en azote de la vigne, mais elle est également influencée par le niveau de rendement et le régime hydrique. L'indice N-tester semble mieux rendre compte de la fertilité du sol sur les parcelles étudiées ; il est par ailleurs moins influencé par le rendement que la teneur en azote assimilable du moût.

En année sèche, le comportement de la vigne dépend davantage du régime hydrique que de son alimentation en azote. Un déficit hydrique réduit la taille des baies et provoque un arrêt de croissance précoce. Dans ces conditions, les baies sont riches en sucres, en anthocyanes et en composés phénoliques et pauvres en acide malique. Les teneurs les plus élevées en anthocyanes et en composés phénoliques ont été obtenues sur une parcelle qui avait subi une très forte contrainte hydrique. Il est à signaler que le rendement de cette parcelle a été modéré après un fort éclaircissage (moins d'un kilo de raisins par souche).

Lorsque le régime hydrique est peu limitant, une faible alimentation azotée est un important facteur de qualité.

L'obtention de raisins à fort potentiel œnologique dans une optique de production d'un vin rouge de garde nécessite l'existence d'un facteur limitant. En année sèche, dans les conditions du Bordelais, ce facteur limitant est le plus souvent une faible alimentation en eau mais peut également être une faible nutrition azotée de la vigne.

Remerciements : Les auteurs remercient les propriétaires des crus qui ont financé cette étude et qui ont mis à disposition leurs parcelles. Ils remercient également Christiane Venencie (Baron de Rothschild S.A), Simon Abrivard et Christian Poupot pour leur contribution efficace.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CHONÉ X., VAN LEEUWEN C., DUBOURDIEU D. and GAUDILLÈRE J.P., 2001a. Stem water potential is a sensitive indicator for grapevine water status. *Annals of Botany*, **87**, n°4, 477-483
- CHONÉ X., VAN LEEUWEN C., CHERY Ph. and RIBÉREAU-GAYON P., 2001b. 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.
- DUTEAU J., GUILLOUX M. et 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.
- GAUDILLÈRE J.-P., VAN LEEUWEN C. and OLLAT N., 2002. Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *J. Exp. Bot.*, **53**, n°369, 757-763.
- KATERJI N. et HALLAIREM., 1984. Les grandeurs de référence utilisables dans l'étude de l'alimentation en eau des cultures. *Agronomie*, **4**, n°10, 999-1008.
- RODRIGUES-LOVELLE B. and GAUDILLÈRE J.-P., 2002. Carbon and nitrogen partitioning in fruiting and non-fruiting grapevines: effects of nitrogen limitation before and after veraison. *Aust. J. Grape & Wine Res.*, **8**, in press.
- SCHOLANDER P., HAMMEL H., EDDA D., BRADSTREET E. and HEMMINGSEN E., 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science*, **148**, 339-346.
- SEGUIN G., 1975. Alimentation en eau de la vigne et composition chimique des moûts dans les Grands Crus du Médoc. Phénomènes de régulation. *Connaissance Vigne Vin*, **9**, n°1, 23-34.
- SEGUIN G., 1986. «Terroirs» and pedology of vinegrowing. *Experientia*, **42**, 861-873.
- SPRING J.-L., 1999. Indice chlorophyllien du feuillage et nutrition azotée du cépage Chasselas. Premières expériences en Suisse romande. *Rev. Suisse Vitic., Arboric, Hortic.*, **31**, n°3, 141-145.
- SPRING J.-L. et ZUFFEREY V., 2000. Intérêt de la détermination de l'indice chlorophyllien du feuillage en viticulture. *Rev. Suisse Vitic., Arboric, Hortic.*, **32**, n°6, 323-328.
- 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.
- VAN LEEUWEN C., FRIANT Ph., SOYER J.-P., MOLOT C., CHONÉ X. et DUBOURDIEU D., 2000. L'intérêt du dosage de l'azote total et l'azote assimilable dans le moût comme indicateur de la nutrition azotée de la vigne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **34**, n°2, 75-82.
- VAN LEEUWEN C., CHONÉ X., TREGOAT O. and GAUDILLÈRE J.-P., 2001a. The use of physiological indicators to assess vine water uptake and to manage vineyard irrigation. *The Australian Grape-grower and Winemaker*, **449**, June 2001, 18-24.
- VAN LEEUWEN C., GAUDILLÈRE J.P. et TREGOAT O., 2001b. Évaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **35**, n°4, 195-205.

Manuscrit reçu le 17 juillet 2002 ; accepté pour publication le 1^{er} septembre 2002