

L'AZOTE DES FEUILLES ET DES MOÛTS, DEUX INDICATEURS COMPLÉMENTAIRES POUR ÉVALUER LE STATUT AZOTÉ DE LA VIGNE

LEAF AND MUST NITROGEN CONTENT TWO COMPLEMENTARY INDICATORS OF GRAPEVINE NITROGEN STATUS

J.-P. GAUDILLÈRE¹ et *, E.CHANTELOT², J.-P. SOYER¹,
Ch. MOLOT¹ et Sylvie MILIN¹

1 : Ecophysiologie et Agronomie Viticole, UMR Œnologie Ampélogie,
INRA Centre de Bordeaux, BP81 33883 Villenave d'Ornon, France
2 : ITV Rhone Méditerranée, Domaine de Donadille, 30230 Rodilhan, France

Résumé : La teneur en azote des feuilles de vignes à la véraison ne peut pas être déduite simplement à partir de la teneur en matière organique et de la texture du sol, du climat et des techniques d'entretien du sol. L'azote des limbes est l'indicateur le plus discriminant comparé à l'azote des pétioles, ou des bois. Il est peu variable au cours de la saison lorsqu'il est exprimé par unité de surface foliaire. La teneur en azote des limbes fournit donc une information générale sur l'accès de la vigne à l'azote. Il permet de raisonner des apports s'il est tenu compte des sources de variations inter annuelles. Il est peu adapté pour décider de fumures de correction à court terme. La teneur en azote des moûts de raisin est bien corrélée à celle des feuilles. Cependant elle dépend aussi du rendement et de l'offre en azote du sol en été.

Summary: Grapevine nitrogen status was assessed by nitrogen content in leaf blade and petiole at veraison, in must at harvest and in pruned wood in December. The comparison of these indicators were done in vineyards bearing adults plants in the Atlantic and Mediterranean climates. Soil nitrogen offer were changed by soil grass cover, fertilization and irrigation. Leaf blade nitrogen (LBN) content cannot be simply predicted from soil texture, training characteristics and climate. Petiole and wood nitrogen content was less precise indicators compared to LBN content per unit dry weight. LBN content based on unit of leaf area usually constant along the growing season provides a complementary information on the leaf photosynthetic capacity and nitrogen availability for grapevine in summer. LBN content informs on the early growth grapevine access to soil and reserve nitrogen. Must and leaf blade nitrogen contents are significantly correlated. But it is shown that must N content is also changed by the yield and the soil capacity to provide nitrogen to the grapevine in summer. A simple predicting model of N in must is proposed. It is based on the availability of N in spring and summer and the positive effect of spring N on berry set up. Leaf blade and must N content considered both provided a complementary information on the grapevine N nutrition along the season. Sampling conditions for LBN content was tested. Primary leaves of a rank above 6 are very similar in N content and most representative of the grapevine N status. The LBN content on a leaf area basis is a more versatile expression because less variable along the growing season. The expressions of LBN content on the dry weight and leaf area can be obtained from a simple analysis by sampling leaf disks.

Mots clés : azote, fertilisation, indicateur, *Vitis*

Key words : nitrogen, fertilisation, indicator, *Vitis*

INTRODUCTION

La gestion de l'alimentation azotée de la vigne permet au viticulteur d'agir sur l'équilibre entre la croissance végétative et le développement des raisins. Une limitation de l'offre en azote ralentit la croissance végétative. Cependant une forte contrainte azotée a des conséquences sur la qualité des raisins, qui deviennent peu fermentescibles et peuvent présenter des défauts olfactifs (FERRARI, 2002). La gestion optimale de

l'azote doit permettre d'assurer la maîtrise de la vigueur végétative tout en préservant une teneur suffisante en acides aminés des moûts. Cette stratégie répond à des objectifs de qualité de la récolte et de limitation des fuites d'azote dans l'environnement.

La fourniture de l'azote aux organes en croissance de la vigne est assurée simultanément par l'absorption et l'assimilation racinaire immédiate et par la remobilisation d'azote stocké dans les organes de réserve

(tiges et racines). La contribution des réserves a été évaluée à 20 à 30 % des besoins (CONRADIE, 1980). Mais l'utilisation du ^{15}N a permis de montrer que dans certaines conditions les réserves azotées des structures pérennes suffisent largement à assurer le développement foliaire annuel de la vigne (GLAD *et al.*, 1994). La contribution de l'absorption d'azote au développement végétatif de la vigne n'est effective qu'à partir de la floraison (CONRADIE, 1980). Elle participe simultanément à la croissance et à la formation de réserves dans les structures pérennes. L'alimentation azotée de la grappe pendant la maturation dépend de l'absorption racinaire courante mais elle peut être assurée par la redistribution des formes azotées stockées dans les racines et le tronc (CONRADIE, 1983). La nutrition azotée de la vigne et particulièrement celle destinée à la croissance annuelle (feuilles, sarments, racines et raisins) est donc très dépendante des réserves azotées stockées dans les structures pérennes qui sont capables de suppléer, de façon très significative pendant toute la saison, une absorption racinaire courante limitante. Le niveau de satisfaction des besoins en azote de la vigne sont donc relativement difficiles à évaluer avec les seuls indicateurs liés au sol (teneurs en matière organique et en azote minéral, KLIEWER, 1991).

La gestion de la fertilisation s'appuie sur des marqueurs du statut azoté de la vigne : azote foliaire, vigueur végétative (vitesse de croissance, poids des bois de taille), azote des moûts et des structures pérennes (RODRIGUEZ-LOVELLE *et al.*, 1997b, CHANTELOT *et al.*, 2002). L'azote des feuilles est un indicateur préconisé depuis les travaux de LAGATU et MAUME (1926) et de Champagnol, (1984). L'usage de la teneur en azote des limbes est basé sur le fait que c'est l'organe de la plante le plus riche en protéines donc en azote (REUTER and ROBINSON, 1997b). Cette méthode a été théorisée par MARCHNER (1995) qui a défini la teneur critique de carence (CDC). Cependant avant d'atteindre ce seuil la vigne a déjà répondu à une offre en azote limitée en modifiant la répartition de sa croissance (INGESTAD and AGREN, 1991). De plus ce seuil exprimé en teneur varie avec le stade de développement de la végétation et l'augmentation au cours du temps du rapport C/N des organes végétaux. L'étude des corrélations entre tous ces indicateurs sur des vignes installées sur différents terroirs montre clairement qu'ils reflètent des conditions d'accès de la vigne à l'azote variables en fonction de la nature des sols et de la saison (CHAMPAGNOL, 1984 ; CHANTELOT *et al.*, 2002 ; Van LEEUWEN *et al.*, 2000).

Dans ce travail nous avons évalué différentes techniques de mesure du statut azoté végétatif de la vigne : la teneur en azote des limbes par unité de poids de

matière sèche ou de surface, les teneurs en azote des pétioles, des moûts et des bois de taille. L'appareil Ntester® (Hydro Agri France) évalue la quantité de chlorophylles par une mesure optique sur le terrain (BAVARESCO, 1995). Cette mesure est proposée pour évaluer le niveau de nutrition azotée de la vigne (SPRING, 1999). Les variations saisonnières des teneurs en azote des limbes en fonction des terroirs et des années sont présentés. Les corrélations établies entre les différents indicateurs permettent d'interpréter les sources de variation des teneurs en azote des différents organes de la vigne (limbes, pétiole, moût, bois). Cette étude est basée sur des vignes cultivées dans un réseau d'expérimentations établies en Gironde et dans le Gard avec différents modes d'entretien du sol (désherbé, enherbé, fertilisé et/ou irrigué).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

I - RÉSEAU DE PARCELLES EXPÉRIMENTALES ET CONDITIONS DE CULTURE

Les feuilles ont été collectées sur des vignes adultes cultivées sur un réseau de 6 parcelles d'essai situé sur les communes de Cadaujac (33, Gironde), Saint Côme, Tresque, Blauzac, Gallargue, Bellegarde (30, Gard). La fourniture en azote du sol est modifiée par la présence ou non d'enherbement, par des apports d'engrais et indirectement par l'irrigation (RODRIGUEZ-LOVELLE *et al.*, 1997a ; CHANTELOT *et al.*, 2002). Ces modalités sont appliquées sur 3 blocs d'au moins 28 souches répartis sur chaque parcelle (tableau I). Les apports d'azote sur vigne enherbée (notées +N sur les graphiques) ont été réalisés au stade début véraison à raison de 5 kg d'azote par hectare par pulvérisation foliaire d'urée. L'irrigation réalisée sur le rang de l'essai Bellegarde 2001 a apporté 2 mm/jour du stade petit pois à la récolte.

Les vignes sont conduites selon le mode traditionnel de chaque région.

II - ÉCHANTILLONNAGE ET ANALYSES FOLIAIRES

Les échantillons foliaires sont composés soit de 20 limbes entiers de feuilles opposées aux grappes soit de 10 disques (6 mm ou 18 mm de diamètre) prélevés sur 10 feuilles primaires adultes de rang 5 à 8. Chaque modalité est répétée 3 fois. Les prélèvements ont été effectués tous les 8 ou 15 jours du début de la floraison à la fin véraison. Les échantillons sont séchés 2 jours à 60 °C, puis pesés et broyés. Le rang des feuilles est défini par l'ordre d'apparition respectivement sur les pousses primaires et secondaires (entre-cœurs). Les pétioles (20) sont échantillonnés à la véraison, séchés 2 jours à 60 °C, puis broyés.

L'azote total a été déterminé par analyse élémentaire (NA 2100 Protein, Fison Instruments, Arcueil, France) ou après minéralisation Kjeldhal et dosage colorimétrique de NH_4^+ (TRAACS, Bran et Lübbe, USA).

Les mesures Ntester ont été réalisées sur les limbes des feuilles primaires proches de la grappe de rang 2. Chaque mesure est la moyenne de 30 déterminations, effectuées après calibration de l'appareil, selon le protocole défini par le constructeur.

RÉSULTATS

I - EFFET DU RANG DES FEUILLES ET DU NIVEAU DE RAMIFICATION

Six rameaux ont été prélevés sur les vignes de Cadaujac le 15 juillet 1998, au stade fermeture de la grappe. La composition azotée et la masse surfacique de tous les limbes des feuilles primaires et secondaires des rameaux a été déterminée (figure 1A). Les feuilles de rang 6 à 14 ne présentent pas de différences signi-

ficatives de teneur en azote exprimée par rapport à la matière sèche des limbes. Les feuilles de rang 1 à 5 présentent des teneurs en azote plus faibles. La teneur pondérale en azote des limbes issus de la croissance secondaire et dont le rang est supérieur à 3 est identique à celle des feuilles primaires de même rang. Les premières feuilles secondaires émises sont plus pauvres en azote que les feuilles de rang supérieur, comme sur le rameau primaire. La masse surfacique des feuilles ne varie pas significativement avec le rang des feuilles (figure 1B). Par contre on observe une différence significative de masse surfacique entre les feuilles primaires et secondaires. Les feuilles secondaires ont une masse surfacique inférieure de 20 % de celle des feuilles primaires. Lorsque la teneur en azote est exprimée par unité de surface on n'observe pas de variation de teneur en azote dans les limbes de la partie médiane des rameaux (du rang 6 au rang 12). Les feuilles primaires basales et distales montrent des teneurs en azote plus faibles (figure 1C). La baisse de teneur en azote par unité de surface pour les premières et les dernières feuilles apparues est nettement plus significative que

Tableau I - Caractéristiques agronomiques des essais.

Les sites sont identifiés par le nom de la commune et le numéro du département administratif. Le bilan hydrique théorique est calculé entre le 1 mai et le 31 août avec la formule : (Précipitations-1/2Evapotranspiration potentielle).

Agronomical traits of the experimental plots.

Each plot is identified by the name of the commune and the number of the administrative department. The theoretical water balance is computed between 1st of may and august the 31th according to the formula: (rain fall – ψ potential evapotranspiration)

Site	Année	% matière organique	Bilan hydrique mai -août (mm)	Cépage	Conduite	Entretien du sol	Rendement (T/ha)
Saint Côme, 30	1998	1.6	-254	Merlot	Cordon de royat, 48 500 b/ha	Désherbé	9.3
						Enherbé	7.7
						Enherbé + fer	8.0
Cadaujac, 33	1998	1.0	-115	Merlot	Guyot double 40 000 b/ha	Désherbé	16.6
						Enherbé	16.9
						enherbé	14.9
Blauzac, 30	1999	1.5	-181	Sauvignon blanc	Cordon de royat 48 000 b/ha	Désherbé	11.0
						Enherbé	10.1
						Enherbé + fer	9.3
Blauzac, 30	2000	1.5	-164	Sauvignon blanc	Cordon de royat 48 000 b/ha	Désherbé	14.0
						Enherbé	8.1
						Enherbé + fer	8.4
Gallargues, 30	2000	1.3	-173	Sauvignon blanc	Guyot simple 53 500 b/ha	Désherbé	11.7
						Enherbé	9.2
						Enherbé + fer	10.2
Gallargues, 30	2001	1.3	-234	Sauvignon blanc	Guyot simple 53 500 b/ha	Désherbé	21.3
						Enherbé	16.4
						Enherbé + fer	17.9
Bellegarde, 30	2001	1.3	-196	Syrah	Cordon de royat, 48 000 b/ha	Désherbé	7.7
						Enherbé	7.4
						Enherbé + fer	6.3
						Enherbé + irr	8.6

celle exprimée en fonction de la matière sèche. L'expression de la teneur en azote par unité de surface foliaire met en évidence une différence marquée de statut entre les feuilles primaires et secondaires.

II - ÉVOLUTION SAISONNIÈRE ET EFFET DE L'OFFRE EN AZOTE DU SOL SUR LA COMPOSITION EN AZOTE DES FEUILLES

Les teneurs en azote des limbes exprimées par unité de poids sec sont maximales au stade floraison (jours 150 à 165 selon les régions et les années, figure 2). Elles décroissent ensuite pour atteindre un palier. La masse surfacique des feuilles primaires augmente pendant cette même période. Elle varie de 58 gm^{-2} à 71 gm^{-2} sur le site de Cadaujac en 1998 (figure 3). Cette variation explique de 86 % à 100 % des variations de teneurs des limbes entre la floraison et la véraison pour la plupart des sites (tableau II). La décroissance de la teneur en azote des feuilles est indépendante des modes d'entretien du sol. Elle est observée sur le site le plus riche en azote (GALLARGUE, 2001). Cette perte saisonnière nette d'azote des feuilles est faible ou nulle dans la majorité des sites étudiés.

L'enherbement ne provoque pas systématiquement une baisse de la teneur en azote des feuilles primaires (figure 2). Seules les parcelles Cadaujac, Blauzac et Bellegarde montrent un effets significatif de l'enherbement. Les apports d'azote par pulvérisation foliaire, au stade fermeture de la grappe, des parcelles enherbées ne modifient pas les teneurs en azote des feuilles. Enfin l'irrigation ne modifie pas le statut azoté des feuilles des parcelles enherbées (Bellegarde).

IV - TENEUR EN AZOTE DES PÉTIOLES, DES MOÛTS ET DES BOIS

La teneur en azote des pétioles à la véraison est corrélée à celle des limbes à la même date. La figure 4A montre une corrélation significative établie sur l'essai de Cadaujac comportant 4 modes d'entretien du sol et 6 années de mesures (152 couples). La meilleure corrélation est obtenue avec une fonction exponentielle. Les variations de teneur en azote des pétioles sont relativement plus faibles que celles des limbes dans la gamme des faibles concentrations dans les limbes (12 à 20 ‰). La régression est significative lorsque l'on considère les échantillons sur toute la gamme de variation de teneur en azote (de 12 à 26 ‰ dans les limbes, figure 4A). Cependant la variabilité résiduelle (somme des carrés des écarts entre les points expérimentaux et la courbe de régression) limite la capacité de prédiction de la teneur en azote du pétiole d'une feuille dont on connaît la teneur en azote du limbe. L'origine de cette variabilité résiduelle est expliquée par la nature différente des organes et en particulier par la faible

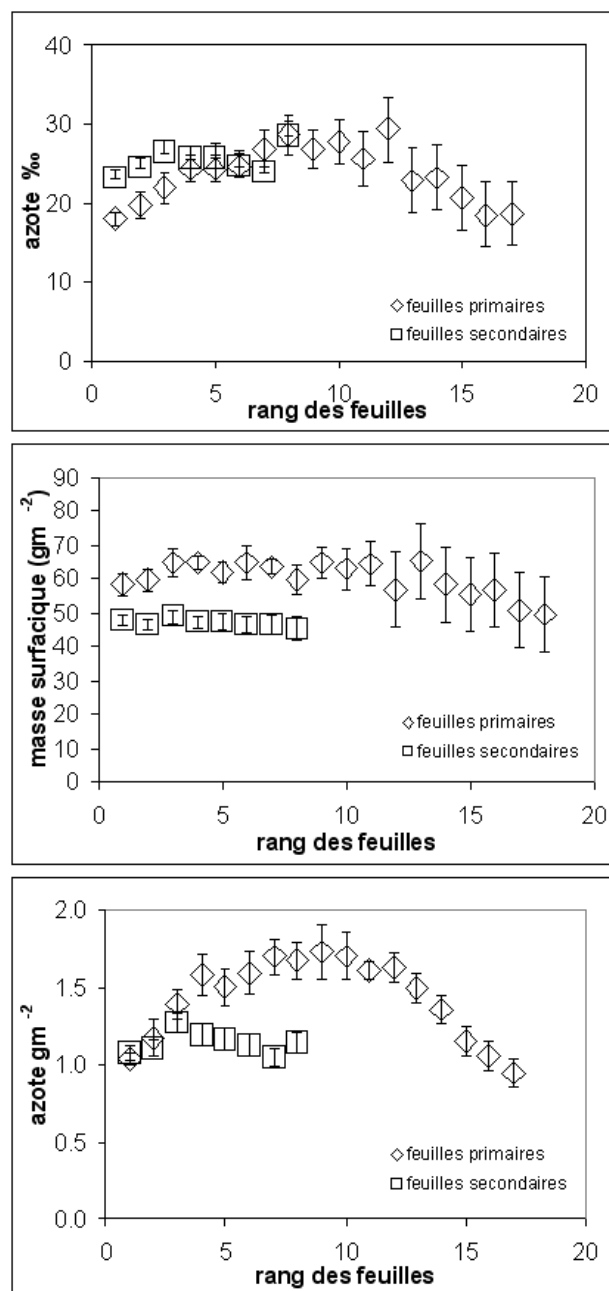


Fig. 1 - Teneur en azote (A), masse surfacique (B) et teneur en azote surfacique (C) des limbes de toutes les feuilles de rameaux de vignes au stade petit pois (jour 196).

Les feuilles sont numérotées par ordre d'apparition sur la pousse primaire et secondaire. Moyenne de 6 rameaux primaires et 16 rameaux secondaires prélevés sur une placette désherbée de l'essai Cadaujac en 1998 (\pm erreur standard).

N content (A), Leaf mass area (B) and N weight by m² (C) of all the blades of the annual shoot at pea size stage of the clusters (day 196).

Leaves are numbered from the oldest to the youngest on the primary and secondary shoot (mean of 6 shoots).

Tableau II - Teneur pondérale moyenne en azote des limbes de vignes à la véraison des différents essais (tous traitements confondus) et pourcentage de variation de la teneur mesurée du stade floraison à la véraison expliqué par l'augmentation de masse surfacique des feuilles.

Grapevine blade N content at veraison and percent of variation from blossoming stage to veraison explained by the increase of the leaf mass area.

site	N‰ des feuilles à la véraison	% de variation expliquée par la variation de masse surfacique
Tresque 1997	23.2	100
Saint Côme 1997	23.3	86
Cadaujac 1998	24.1	100
Blauzac 1999	21.6	93
Blauzac 2000	10.9	90
Gallargue 2000	15.7	91
Gallargue 2001	26.1	79
Bellegarde 2001	23.5	92

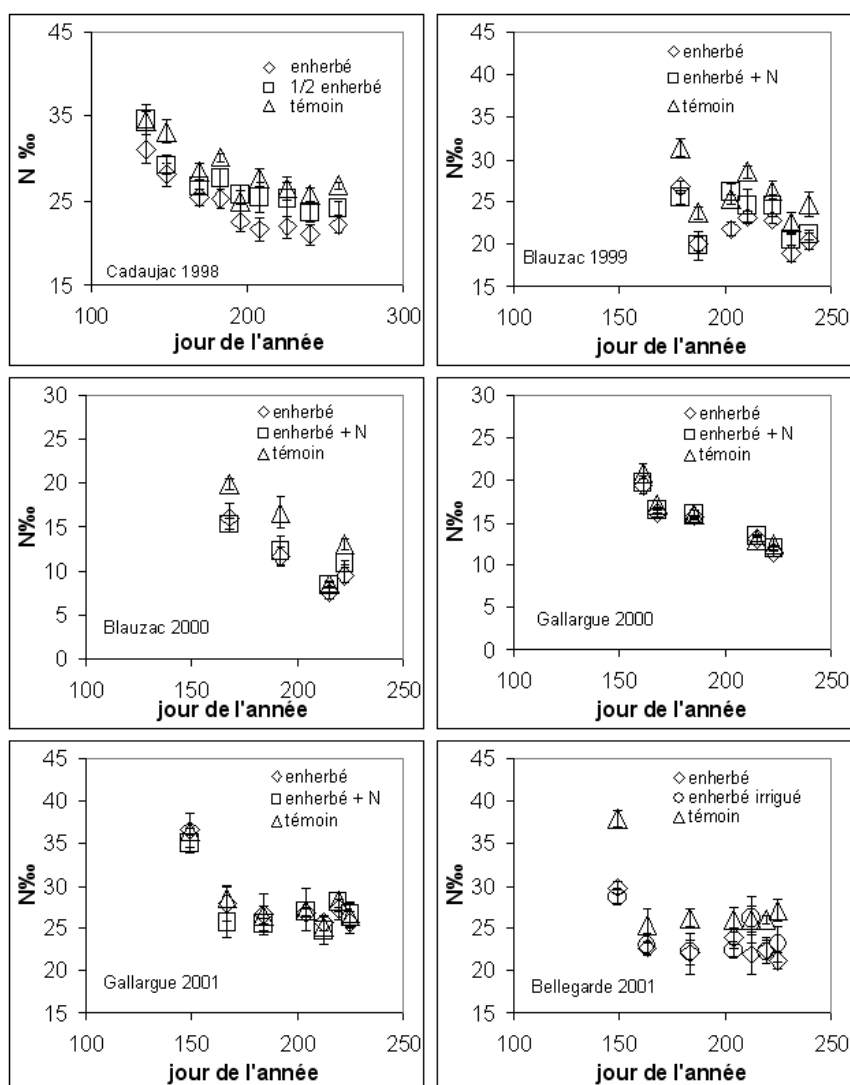


Fig. 2 - Variations saisonnières de la teneur pondérale en azote des feuilles de vigne. (moyenne de 4 à 9 mesures ± erreur standard).

Enherbé : présence d'herbe semée sur l'inter-rang. Enherbé +N enherbement et apport de 5 kg d'azote par hectare par pulvérisation foliaire début véraison. Témoin : désherbage chimique.

Seasonal change of the blade N content (mean of 6 to 9 measures ± standard error).

Enherbé: with grass on the interrow. Enherbé+N, grass on the interrow and foliage spray of 5 kg of N per hectare (urea), at veraison. Temoin: control, without grass and N application.

teneur en protéines des pétioles par rapport aux limbes et par des réponses physiologiques différentes des limbes et des pétioles en fonction de la nutrition azotée de la plante.

De même on observe des corrélations significatives entre le contenu en azote des limbes à la véraison et celui des moûts à maturité (figures 4B). La relation avec l'azote des moûts n'est pas linéaire. Par contre la variabilité résiduelle est beaucoup moins importante (R_2 égale 0.82 pour la relation limbe-moût et 0.64 pour la relation limbe-pétiole). Le contenu en azote du bois de taille n'est que faiblement corrélé à l'azote des limbes (figure 4C).

La relation entre les teneurs en azote des moûts et le rendement T/ha de grappes a été recherchée sur la même expérimentation de Cadaujac comparant trois modes d'entretien du sol : enherbé, enherbé 1 interrang sur 2 et désherbé (figure 5). Sur le sol nu (DES) on observe une corrélation négative entre le rendement et la teneur en azote des moûts ($R_2=0.72$). Lorsque de l'herbe est installée tous les rangs (ENH) le contenu en azote des moûts est positivement corrélé au rendement ($R_2=0.67$) avec cependant une pente faible. La modalité enherbé un interrang sur deux est intermédiaire.

La relation entre l'azote des bois et l'azote des limbe (figure 4C) est linéaire, significative mais peu précise (R_2 égale 0.49). La présence d'herbe sur le rang modifie l'accès des vignes et des raisins à l'azote et modifie l'effet dilution d'une ressource en azote limitante par le rendement.

V - VARIATIONS INTER-ANNUELLES DU STATUT AZOTÉ DES VIGNES

Les parcelles de Blauzac et Gallargues montrent des différences marquées de composition azotées des

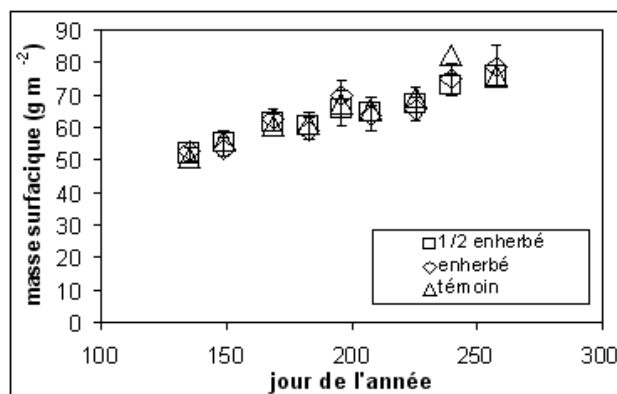


Fig. 3 - Variation de la masse surfacique des feuilles au cours de la saison à Cadaujac en 1998 (moyenne de 9 échantillons \pm erreur standard).

Leaf mass area change during the growing season at Cadaujac in 1998 (mean of 9 samples \pm standard error)

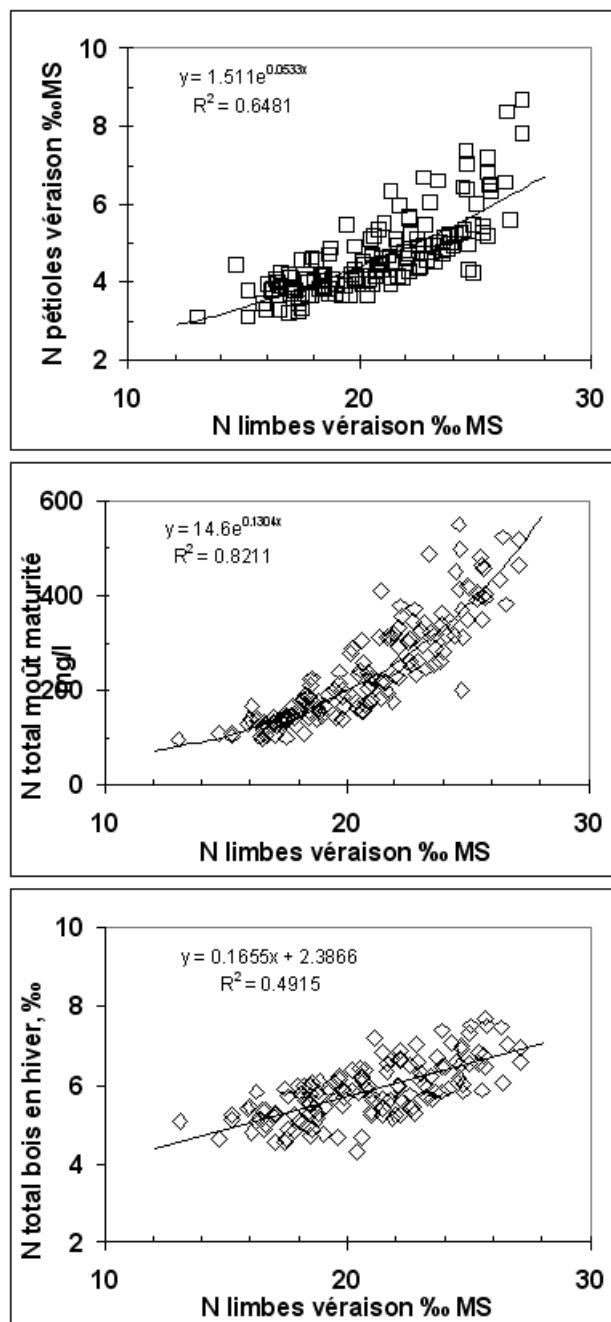


Fig. 4 - Relations entre la teneur en azote des feuilles à la véraison et celle des pétioles (A), des moûts à la récolte (B) et celle des bois de taille en décembre (C) entre 1995 et 2000 sur des vignes cultivées sur l'essai de Cadaujac comportant les 4 modalités d'entretien du sol : enherbé tous les rangs, enherbé 1 rang sur 2, désherbé et cultivé.

Relationship between N blade content at veraison and petioles (A), must at harvest (B) and pruned wood in december (C). Data collected from 1995 to 2000 at Cadaujac on 4 treatments: grass cover of all the interrows, grass on half the interrows, chemically weeded, weeded by tillering.

feuilles pour les deux années d'observation (tableau II). L'origine de ces différences est à rechercher dans des interactions vigne-sol différentes. On note peu de différences de bilan hydrique et de rendement moyen sur le site de Blauzac (tableau I). Par contre le site de Gallargues est beaucoup plus sec en 2001 et est caractérisé par un rendement élevé (tableau I).

Les variations pluriannuelles des principaux indicateurs azotés de la vigne ont été enregistrés sur le site de Cadaujac (figure 6). En l'absence de fertilisation et sans modification des modes d'entretien du sol on note des variations inter-annuelles significatives des concentrations en azote des limbes, des pétioles et des bois. L'azote des moûts présente les variations les plus importantes, avec quelques années à faible accumulation d'azote dans les moûts (1995 et 1999). Ces deux années sont caractérisées par des rendements moyens plus élevés 16.5 et 17.1 t ha⁻¹ que la moyenne des 4 autres années (14.3 t ha⁻¹). Le bilan hydrique annuel est fortement négatif en 1995 (-122 mm), positif en 1999 (+42 mm). Par contre ces deux années présentent un fort déficit hydrique pendant la période véraison-maturité, respectivement -37.5 mm et -39 mm en 1995 et 1999. Le bilan hydrique moyen des années 1996, 1997 et 1998 était de + 56 mm.

VI - MESURE DE LA COULEUR DES FEUILLES

La couleur verte des feuilles est évaluée par l'indice Ntester. La figure 7 montre les relations entre la teneur en azote des limbes et l'indice Ntester en à la floraison, en juin, et entre le stade fermeture de la grappe et la véraison, en juillet-août. L'intensité de couleur verte diminue au cours de la saison alors que la teneur moyenne en azote des limbes augmente. Si on considère séparément ces deux périodes, on ne constate aucune relation entre la couleur des feuilles et la valeur de l'indice bien que des écarts significatifs sont constatés entre les feuilles prélevées en juillet-août sur les différentes placettes de l'essai enherbement.

DISCUSSION

I - LE LIMBE ORGANE INDICATEUR DU STATUT AZOTÉ DE LA VIGNE

1) Variabilité saisonnière de l'azote des limbes.

Le niveau de l'offre en azote a des conséquences sur le développement de la plante et sur sa composition (MARSCHNER, 1995). Il est généralement évalué par une mesure de la productivité des cultures (REUTER et ROBINSON, 1997a; SMITH *et al.*, 1985). Ce critère est particulièrement inadapté à la vigne, pour laquelle la maximisation des rendements n'est pas recherchée. La première réponse d'une cul-

ture à une limitation azotée est une diminution de la vitesse de croissance. La modification du rapport C/N est une réponse plus tardive. C'est ce rapport ou la teneur pondérale en azote qui sont généralement retenus comme indicateurs du statut azoté de la culture. GASTAL et LEMAIRE (1997) ont proposé une méthode qui prend en considération des effets de la nutrition azotée sur la croissance. La culture est caractérisée par une courbe de teneurs critiques qui relie la

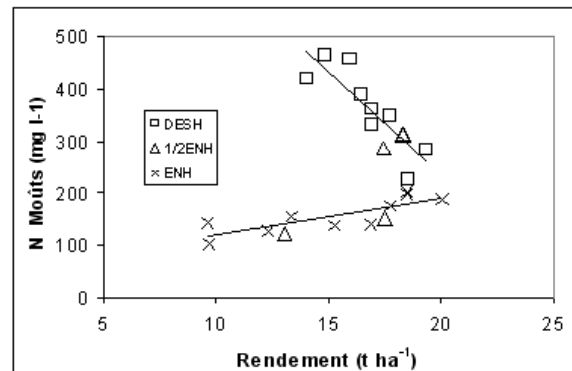


Fig. 5 - Relation entre le rendement et la teneur en azote des moûts en 1998. Raisins prélevés sur l'essai de Cadaujac respectivement sur 10 placettes enherbées, dés herbées.

Les droites de régression sont calculées pour chacune de ces modalités. Les triangles présentent les mesures réalisées sur les 5 placettes enherbées. Les points de l'essai enherbé ne participent au calcul des régressions.

Relationship between the yield and the must N content in 1998. Grapes were harvested on the Cadaujac trail respectively on ten grass cover (ENH) and deweeded individual plots (DESH).

Linear regressions are drawn for these 2 treatments. Triangles show the must N content in the half grass covered plots.

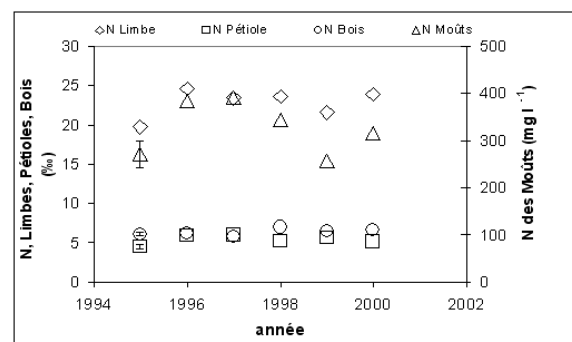


Fig. 6 - Variation interannuelle des teneurs en azote des limbes et pétioles à la véraison, des moûts à la récolte et des bois de taille en décembre.

Échantillons prélevés sur l'essai de Cadaujac sur les placettes dés herbées (moyenne de 10 répétitions ± erreur standard).

Inter annual change of blade and petiole N content at véraison, must at harvest and pruned wood in december.
Samples from the deweeded blocs of Cadaujac plot.

teneur en azote de la culture et la quantité de biomasse aérienne accumulée au cours du cycle de végétation. Ces relations ont été établies sur des cultures au stade végétatif. Elles ne sont plus valables lorsque des organes de stockage sont présents (fruits, organes de stockage végétatifs annuels ou pérennes). La teneur pondérale en azote des limbes de vigne au cours du cycle de végétation (figure 2) suit une courbe de dilution comparable à celle décrite par GASTAL et LEMAIRE (1997) pour la biomasse aérienne. D'autre part, la masse surfacique des feuilles primaires augmente régulièrement avec leur âge (figure 3). La variation de masse de feuille par unité de surface explique de 86 à 100 % de la variation de teneur pondérale (tableau II) dans 7 des 8 essais réalisés. La seule exception est observée sur l'essai de GALLARGUES en 2001 dans lequel la teneur en azote foliaire est la plus élevée. La baisse de teneur en azote, lorsqu'elle est rapportée à la surface de limbe, permet de révéler une exportation nette d'azote foliaire vers le métabolisme azoté de la vigne et des raisins. Cette remobilisation saisonnière de l'azote foliaire n'est donc peu significative dans notre réseau de parcelles. Elle ne semble concerner que les vignes les mieux alimentées en azote.

2) Effets de la nature et du mode d'entretien des sols

La teneur en azote des feuilles de vigne varie en fonction des sites et pour un même site en fonction de l'année. En absence de fertilisation azotée, les facteurs liés au sol qui agissent sur l'offre en azote sont la teneur en matière organique, le taux de calcaire, et l'humidité des sols (TRINSOUTROT *et al.*, 2000). Tous ces facteurs déterminent la vitesse de minéralisation de la matière organique. La présence d'herbe consommatrice de l'azote minéral diminue l'offre du sol pour la vigne. Les besoins en azote de la vigne sont déterminés par la vitesse de croissance végétative. La contrainte hydrique estivale en réduisant la croissance de la vigne, limite ses besoins azotés et déplace l'équilibre entre offre du sol et demande en azote de la vigne. La sécheresse agit en priorité sur la demande végétative en ralentissant la croissance. Elle favorise les teneurs en azote foliaire élevées. Cependant cet effet dépend de la sensibilité de l'offre en azote du sol qui est ralentie en cas de sécheresse. Le bilan est établi en fonction des seuils de réponses respectifs de la vigne et du sol à la contrainte hydrique. Le statut azoté de la vigne reflète les interactions entre tous ces facteurs. Chacun de ces facteurs, considéré isolément, ne peut pas expliquer le statut azoté de la vigne mesuré par la teneur en azote des limbes à la véraison. Les teneurs moyennes en azote des feuilles varient significativement en fonction des années sur les sites en climat méditerranéen (tableau II, BLAUZAC et GALLARGUES) et en cli-

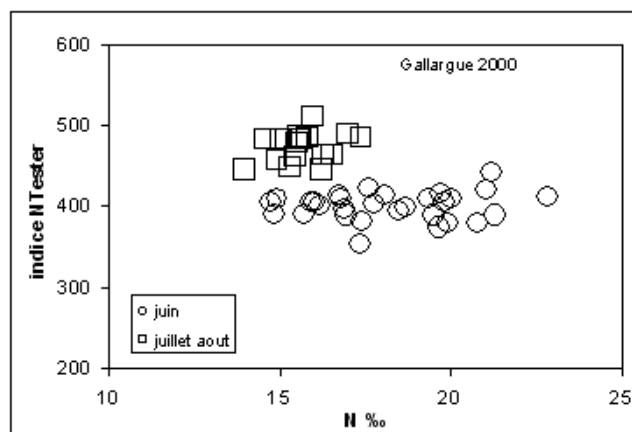


Fig. 7 - Relations entre la teneur en azote des limbes et la valeur de l'indice Ntester mesurés en juin, juillet et août 2000 sur le site de Gallargues.

Relationship between N blade content and N tester rating measured in June, July and August 2000 at Gallargues

mat atlantique (Cadaujac, figure 6). Dans une parcelle sans apport de fertilisant les fluctuations de la teneur en azote des feuilles sont probablement expliquées par les conditions hydriques printanières (1995 à Cadaujac, figure 6). La teneur en azote des moûts est l'indicateur qui montre les amplitudes inter-annuelles les plus grandes. Ces variations sont classiquement expliquées par les variations de rendement. Mais on observe une modification de la relation lorsque la vigne est enherbée (figure 5). En absence d'herbe, tout l'azote du sol est accessible à la vigne. La relation négative entre le rendement et la teneur en azote des moûts est expliquée par la dilution par le rendement d'une quantité déterminée d'azote fournie par le sol en été. En présence d'herbe on observe une indépendance de la teneur en azote des moûts en fonction du rendement. La différence entre ces deux relations peut être expliquée par deux hypothèses. D'une part, il existerait une relation entre la disponibilité en azote avant la véraison et le nombre de fruits noués. D'autre part l'herbe limiterait très fortement l'accès de la vigne à l'azote du sol en été. Cette limitation peut être due à une compétition pour l'azote et/ou à un déplacement du système racinaire de la vigne dans les couches profondes pauvres en matière organique. Le statut azoté des raisins à la récolte est donc très dépendant des effets de l'herbe sur l'accès de la vigne à l'azote du sol.

À partir de ces deux hypothèses un modèle de comportement peut être proposé :

- le rendement (RDT) est fonction du stock d'azote disponible au printemps (NP) aux stades floraison et nouaison.

$$\text{RDT} = k_1 (\text{NP}) \quad \text{équation 1}$$

- l'azote disponible pour les raisins est celui qui est disponible au printemps (NP) plus celui qui est assimilé par la vigne en été (NE). Dans un sol enherbé, la vigne ne peut pas s'alimenter en azote en été. L'azote disponible pour les raisins est limité à celui disponible au printemps. La simulation des teneurs en azote des moûts (NMO) est obtenue en calculant le rapport entre l'azote disponible pour les raisins et le rendement :

Pour une vigne enherbée :

$$\text{NMOe} = \text{NP/RDT} \quad \text{équation 2}$$

Pour une vigne désenherbée :

$$\text{NMOd} = (\text{NP} + \text{NE}) / \text{RDT} \quad \text{équation 3}$$

Si on considère l'équation 1, les équations 2 et 3 deviennent :

$$\text{NMOe} = 1/k_1 \quad \text{équation 4}$$

$$\text{NMOd} = 1/k_1 + \text{NE/RDT} \quad \text{équation 5}$$

Ce modèle conduit à des relations similaires à celles observées dans l'essai Cadaujac (figure 5). Lorsque l'azote du sol n'est pas disponible en été (vigne enherbée) l'azote des moûts est indépendant du rendement en raisins. Chez une vigne sur sol nu, pour une même quantité d'azote assimilé par la vigne en été, la teneur en azote des moûts diminue avec le rendement.

Les teneurs en azote des pétioles et des bois sont corrélées avec la teneur en azote des limbes (figure 4) mais sont relativement moins affectées dans les gammes de nutrition faibles et moyennes.

Les effets de l'enherbement sur la teneur en azote foliaire varient selon les parcelles. Aucun effet significatif de l'enherbement n'est observé à Gallargues 2000 et 2001. L'effet de l'enherbement est significatif dans les autres essais dès les premiers prélèvements à la floraison. L'effet est indépendant de la teneur moyenne en azote des limbes des vignes. Les apports d'azote foliaire complémentaires, ou une irrigation, ont peu d'effet sur la teneur en azote des feuilles au cours de la saison.

En conclusion, la teneur en azote foliaire est donc un indicateur peu sensible aux variations saisonnières de l'environnement postérieures à la phase de mise en place du feuillage au printemps. Elle traduit d'abord la fertilité du sol (teneur en matière organique et composition granulométrique, potentiel de minéralisation). Cette fertilité est modulée en particulier par les conditions environnementales qui contrôlent la minéralisation comme l'humidité du sol au printemps. On peut aussi penser que d'autres facteurs comme l'excès d'eau en défavorisant l'oxygénation du sol et le réchauffe-

ment du sol au printemps peuvent contribuer à une réduction de l'offre en azote nécessaire pour établir le feuillage. Une fois établi, le statut azoté des feuilles est relativement stable au cours de la saison. Les feuilles contiennent apparemment peu d'azote remobilisable capable de contribuer à l'alimentation azotée de la vigne.

Les variations inter-annuelle du statut azoté des raisins de vignes cultivées sur une parcelle non fertilisée à Cadaujac sont significatives (figure 6). Les plus faibles teneurs sont observées les années où le bilan hydrique pendant la maturation est particulièrement déficitaire (1995 et 1999). Le ralentissement de l'offre en azote du sol en été crée les conditions de limitation de la fourniture d'azote aux raisins. Il y a donc une relation entre la sécheresse du sol et le statut azoté de la vigne. Nous montrons par ailleurs que la présence d'herbe conduit à une réduction de la fertilité des sols vis à vis de la vigne probablement par un effet de compétition mais aussi en provoquant un assèchement plus important du sol enherbé et une inhibition de la minéralisation de la matière organique du sol. Le statut azoté de la vigne peut donc être décrit en observant la teneur en azote des feuilles mais en tenant compte des conditions hydriques printanières. Ce statut peut être confirmé en observant la teneur en azote des moûts mais toujours en tenant compte de la climatologie et du mode d'entretien du sol. De plus il est montré que le rendement en raisins est un facteur supplémentaire à prendre en compte. L'azote des limbes et l'azote des moûts sont 2 indicateurs corrélés mais pas équivalents. La gestion de la fertilisation du vignoble doit s'appuyer sur des analyses foliaires et de moûts réalisées plusieurs années consécutives pour prendre en compte ces sources de variation et ajuster les apports de façon à éviter des excès dans le but de maîtriser la vigueur végétative et la composition azotée minimale des raisins.

CONDITIONS DE MESURE

L'étude de la variabilité de la teneur en azote foliaire en fonction du rang des feuilles montre que les premières feuilles apparues sur le rameau ont une teneur en azote inférieure à la moyenne des feuilles des rameaux primaires et secondaires (figure 1). Ces différences peuvent être dues à une nutrition azotée lente au printemps liée à un sol froid ce qui limite la minéralisation, ralentit l'activité d'absorption racinaire de l'azote du sol et la remobilisation des réserves (KLEWER, 1991). Des différences structurales des premières feuilles émises des bourgeons (feuilles préformées dans les bourgeons) peuvent aussi modifier le rapport C/N de ces premières feuilles puisque cet effet est observé également sur les rameaux secondaires qui se développe à une période où l'absorption

racinaire est établie et permet une alimentation homogène des feuilles primaires.

La faible variabilité des teneurs des feuilles adultes entre les rangs 6 et 14 (feuilles primaires et secondaires) facilite l'échantillonnage en vue de faire un diagnostic de nutrition azotée. Les feuilles associées aux grappes, de rang inférieur à 5, sont souvent préconisées pour établir des diagnostic de nutrition minérale. Elles ne sont pas les plus représentatives du niveau de nutrition azotée des vignes conduites en port vertical bas (taille Guyot ou en cordon). Elles peuvent être relativement plus affectées par les maladies, les traitements phytosanitaires et les rognages et effeuillages. Le choix de ces feuilles basses pour poser un diagnostic de statut azoté de la vigne n'est donc pas justifié. Il est préférable de sélectionner des feuilles adultes, saines et représentatives de la population majoritaire des feuilles primaires de la vigne.

L'expression de la quantité d'azote par unité de surface foliaire permet de prendre en compte les différences de structures foliaires. Ce mode d'expression permet de rendre compte des différences de structure entre feuilles primaires et secondaires. Ce mode d'expression est plus approprié pour rendre compte de la relation entre nutrition azotée et aptitudes photosynthétiques des feuilles qui varient avec le rang de la feuille (SCHULTZ, 1993). L'activité photosynthétique des feuilles dépend de leur teneur en protéines (LAWLOR *et al.*, 1989). L'expression de la quantité d'azote par unité de surface foliaire donne donc une information indirecte sur les aptitudes photosynthétiques des feuilles corrigée des variations de structure avec l'âge ou le statut primaire ou secondaire. Ce mode d'expression permet d'établir un bilan azoté des feuilles adultes et d'évaluer la contribution de l'azote foliaire à l'alimentation azotée des organes en croissance de la vigne au cours de la saison. Les différentes vignes retenues dans cette étude n'ont pas montré de contribution importante de l'azote des feuilles adultes au développement des raisins en été. Une évaluation plus complète du rôle de l'azote foliaire dans l'approvisionnement des baies est à entreprendre dans des conditions viticoles plus variées. Du point de vue pratique la relative stabilité de la teneur en azote exprimée par unité de surface facilite l'échantillonnage des feuilles qui est peu dépendant de la date de prélèvement entre le stade fermeture de la grappe et fin véraison.

3) Validité des autres indicateurs

L'indice N tester s'est révélé inefficace dans tous nos essais (variation entre 400 et 500). BAVARESCO (1995) a montré que cet indice est discriminant dans des situations de carence prononcée pour lesquelles

l'indice varie entre 100 et 400. SPRING (1999) montre un phénomène de saturation de la réponse de l'appareil à partir de 400. L'indice N tester est donc probablement efficace dans les situation de forte carence. Cependant cette mesure est indirecte et tout phénomène accompagné d'un changement de teneur en chlorophylles comme la chlorose va perturber la mesure du statut azoté de la vigne par le Ntester (IMSANDE, 1998). Cette méthode n'est donc pas recommandée pour diagnostiquer le statut azoté de la vigne.

Les teneurs en azote des pétioles et des bois sont significativement corrélées aux teneurs des limbes. Cependant ce sont des indicateurs peu discriminants dans les situations où l'azote est limitant (KLEWER, 1991). La teneur en azote des moûts est bien corrélée à celle des limbes. Mais comme pour les pétioles la relation n'est pas linéaire et cet indicateur perd donc de la sensibilité aux faibles niveaux de nutrition azotée.

CONCLUSIONS

L'observation pluriannuelle des indicateurs azotés de la vigne sur un dispositif expérimental situé en Gironde et dans le Gard permet de constater que la teneur en azote des limbes reflète le statut azoté général de la vigne en interaction avec le fonctionnement du sol et le climat. Il informe sur le niveau moyen d'offre en azote des sols qui est souvent mal expliqué par les seules variables liées à la minéralisation de l'azote. Cet indicateur fournit donc une information utile sur le fonctionnement intégré du système sol-vigne. Cependant cette information doit être raisonnée en tenant compte de la composition en azote des moûts qui dépend du climat estival et de la charge en fruits. Des informations complémentaires sur les conditions de minéralisation de la matière organique des sols (granulométrie, teneur en matière organique des sols, bilan hydrique local) et sur les caractéristiques de vigueur et de fertilité de la vigne (poids des bois de taille et rendement) participent à l'établissement du le diagnostic du statut azoté d'une vigne et au raisonnement des apports éventuels.

Remerciements : Dominique Forget et l'équipe du Domaine Expérimental de Couhins (INRA) ont participé aux expérimentations menées à Cadaujac. Ce travail a bénéficié d'un financement du Conseil Régional d'Aquitaine et du Conseil Interprofessionnel des Vins de Bordeaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAVARESCO L., 1995. Utilisation d'un compteur non destructif pour déterminer la concentration en chlorophylle dans les feuilles de vigne. *Bull. OIV*, **68**, 406-414.

- CHAMPAGNOL F., 1984. *Éléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*, ed. F. Champagnol, Prades le lez., 351 p.
- CHANTELOT E, GAUDILLÈRE JP, KUNTZMANN P, and MEYER E., 2002. L'enherbement permanent du vignoble et concurrence hydro-azotée : constats et hypothèses. *Colloque 5-6 septembre 2002*, Geiseheim.
- CONRADIE W. J., 1980. Seasonal uptake of nutrients by Chenin blanc in sand culture. I Nitrogen. *S. Afr. Enol. Vitic.*, **1**, 59-65.
- CONRADIE W. J., 1983. The uptake and distribution of ¹⁵N enriched nitrate by three rootstock cultivars grafted to Chenin blanc. *S. Afr. J. Enol. Vitic.*, **4**, 45-47.
- FERRARI G., 2002. Revue bibliographique : Influence de la composition azotée des moûts sur la qualité des vins et eaux-de-vie. Relations avec les arômes et les défauts. *J. Int. Sci. Vigne et Vin*, **36**, 1-10.
- GASTAL F. and LEMAIRE G. (1997). Nutrition azotée et croissance des peuplements végétaux. *In: Assimilation de l'Azote chez les plantes; aspects physiologiques, biochimiques et moléculaires* (J.F. Morot-Gaudry, ed.), pp. 355-367. INRA, Paris.
- GLAD C., FARINEAU J., REGNARD J.L. and MOROT-GAUDRY J. F., 1994. The relative contribution of nitrogen originating from two seasonal ¹⁵N supply to the total nitrogen pool present in the bleeding sap and in whole *Vitis vinifera* cv Pinot noir grapevines at bloom time. *Am. J. Enol. Vitic.*, **45**, 327-332.
- IMSANDE J., 1998. Iron, sulfur, and chlorophyll deficiencies: E need for an integrative approach in plant physiology. *Physiol. Plant.*, **103**, 139-144.
- INGESTAD T. and AGREN G. I., 1991. The influence of plant nutrition on biomass allocation. *Ecological Appl.*, **1**, 168-174.
- KLIEWER W. M., 1991. Methods for determining the nitrogen status in vineyards. *in : International Symposium on Nitrogen in Grapes and Wines*. 133-147.
- LAGATU H. and MAUME L., 1926. Diagnostic de l'alimentation d'un végétal par l'évolution chimique d'une feuille bien choisie. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **182**, 633-655.
- LAWLOR D. W., KONTTURI M. and YOUNG A.T., 1989. Photosynthesis by Flag Leaves of Wheat in Relation to Protein, Ribulose Bisphosphate Carboxylase Activity and Nitrogen Supply. *J. Exp. Bot.*, **40**, 43-52.
- MARSCHNER H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*, ed. Academic Press, London.
- REUTER D. J. and ROBINSON J. B., 1997a. *Plant analysis, an interpretation manual*, ed. CSIRO Publishing, Collingwood., 572 p.
- RODRIGUEZ-LOVELLE B., SOYER J.P. and MOLOT C., 1997a. Incidence of permanent grass cover on grapevine phenological evolution and grape berry ripening. *In: 5th Int. symp. on grapevine physiology*. Jerusalem Israel. ISHS, 241-248.
- RODRIGUEZ-LOVELLE B., SOYER J. P. and MOLOT C., 1997b. Nitrogen availability in vineyard soils according to soil management practices on vines. *in : 5th Int. symp. on grapevine physiology*. Jerusalem. 277-286.
- SCHULTZ H.R., 1993. Photosynthesis of sun and shade leaves of field-grown grapevines (*Vitis vinifera* L.) in relation to leaf age. Suitability of the plastochron concept for the expression of the physiological age. *Vitis*, **32**, 197-205.
- SMITH G.S., CORNFORTH I.S. AND HENDERSON H.V., 1985. Critical leaf concentrations for deficiencies of nitrogen, potassium, phosphorus, sulfur, and magnesium in perennial ryegrass. *The New Phytologist*, **101**, 393-409.
- SPRING J. L., 1999. Indice chlorophyllien du feuillage et nutrition azotée du cépage Chasselas. *Rev. Suisse Vitic. Arboric. Hortic.*, **31**, 141-145.
- TRINSOUTROT I., NICOLARDOT B., JUSTE E. and RECOUS S., 2000. Decomposition in the field of residues of oilseed rape grown at two levels of nitrogen fertilisation. Effects on the dynamics of soil mineral nitrogen between successive crops. *Nut. Cycl. Agroecosystems*, **56**, 125-137.
- VAN LEEUWEN C., FRIANT P., SOYER J.P., MOLOT C., CHONÉ X. and 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**, 75-82.

Manuscrit reçu le 26 mars 2003 ; accepté pour publication le 26 mai 2003