IFV Sud-Ouest

Institut Français de la Vigne et du Vin

L'AZOTE : UN ÉLÉMENT CLÉ EN VITICULTURE ET EN OENOLOGIE

RENCONTRE TECHNIQUE ORGANISÉE PAR L'IFV SUD-OUEST

JEUDI 8 DÉCEMBRE 2011

HÔTEL DE RÉGION DE MIDI-PYRÉNÉES

À TOULOUSE

INTRODUCTION

J.F. ROUSSILLON

Président du pôle Sud-ouest de l'institut français de la vigne et du vin - IFV sud-ouest

Sommes-nous prêts ? Sommes-nous armés ?

Pour aborder une compétition, il faut d'abord connaître ses points forts et ses faiblesses…pour appuyer sur les uns et améliorer les autres.

La compétition c'est aussi connaître ses adversaires, analyser leur stratégie et parfaitement appréhender le terrain sur lequel elle se déroule.

En un mot, être compétitif passe par une phase d'analyse, une phase de réflexion alimentée par des informations et des références technico-économiques.

A travers cette journée, nous souhaitons apporter quelques uns de ces éléments à nos entreprises pour qu'elles soient prêtes et mieux armées pour faire face à la concurrence mondiale, pour qu'elles occupent une position forte sur les marchés, pour qu'elles soient compétitives.

DIAM

Le liège réinventé

SOMMAIRE

- L'azote chez la vigne : dynamique des besoins, de l'assimilation, du stockage et de la redistribution vers les fruits.....3
  Jean-Pascal Goutouly, INRA Bordeaux - ISVV - UMR EGFV
- Intérêt et limites des différentes formes d'azotes apportées au sol en viticulture.....9
  Pascal Guilbault, Chambre d'Agriculture de la Gironde
- Impact de l'entretien du sol sous le rang sur la teneur en azote des moûts.....13
  Christophe Gaviglio, IFV Sud-Ouest
- Les méthodes d'estimation de l'alimentation azotée de la vigne et des raisins au vignoble : état de l'art.....17
  Cornelis van Leuwen, Enita Bordeaux
- Spécialités biologiques, soufre élémentaire ou sulfate : denières actualités sur les pulvérisations azotées foliaires.....23
  Thierry Dufourcq, IFV Sud-Ouest
- Optimisation de l'utilisation de la bentonite ; intérêt des collages sur moût pour préserver l'aromatique des vins.....27
  François-Xavier Sauvage, INRA Montpellier - Unité Mixte de Recherche Sciences pour l'Oenologie

Planter une vigne engage l'avenir

ENTAV INRA®

La marque des pépiniéristes et des vignerons français

ENTAV-INRA®, c'est un choix unique de plus de 300 cépages et de 1 100 clones agréés, le fruit d'une recherche de pointe au niveau mondial et d'un réseau de tous les vignobles de France.

ENTAV-INRA® : Institut Français de la Vigne et du Vin, Domaine de l'Espiguette - 30240 Le Grau du Roi. Tél. 04 66 8000 20
Retrouvez la marque ENTAV-INRA® sur www.vignevin.com

L'AZOTE CHEZ LA VIGNE :

DYNAMIQUE DES BESOINS, DE L'ASSIMILATION, DU STOCKAGE ET DE LA REDISTRIBUTION VERS LES FRUITS

JEAN-PASCAL GOUTOULY
INRA BORDEAUX - ISVV - UMR 1287 EGFV, Institut des Sciences de la Vigne et du Vin
210 Chemin de Leysotte CS 50008, 33882 Villenave d'Ornon Cedex, jean-pascal.goutouly@bordeaux.inra.fr

INTRODUCTION

L'azote, facteur principal pour la production et la satisfaction des besoins des cultures, occupe la première place dans la démarche d'optimisation des productions végétales. Pour la vigne, les effets de la gestion de l'azote sur les processus physiologiques ont fait l'objet de nombreuses revues (Stefanelli et al., 2010 ; van Leeuwen, 2010, pour les plus récentes) montrant que l'azote minéral (nitrate et ammonium) est le principal facteur limitant de la production, agissant à la fois sur les composantes quantitatives et qualitatives. En effet, se pose le problème de sa disponibilité dans le sol. Celle-ci évolue notamment en fonction des facteurs pédoclimatiques et culturaux. Les caractéristiques physiques du sol, sa texture, son pH, conditionnent le fonctionnement du système racinaire, modifiant sensiblement les capacités d'assimilation, le niveau de nutrition des systèmes végétatifs et fructifères. Mais l'élaboration du produit final, la grappe, nécessite aussi de connaître les besoins de la plante au cours de son cycle végétatif.

Confronter « besoin de la plante » et « offre du sol », compléter cette offre, la maintenir et l'améliorer sont les objectifs de la fertilisation raisonnée. A cela s'ajoute la nécessité d'une meilleure gestion de l'écosystème à propos des facteurs de pollution effective ou potentielle. La vigne est cependant l'espèce fruitière pour laquelle la fertilisation azotée demeure la plus faible. Les analyses de sols et le diagnostic pétiolaire et/ou du limbe sont les outils incontournables (Spring et al., 2003). Mais actuellement et contrairement au cas des plantes annuelles, le viticulteur ne possède pas encore d'outil d'analyse dynamique d'aide à la décision, pour ajuster les intrants aux besoins de la vigne (très faibles en vignoble de cru) et au climat de l'année. Outre les risques de pollution, la surfertilisation présente le risque d'un excès de végétation et d'une baisse dans la qualité des fruits (retard de maturité, répercussions néfastes sur le goût et la coloration, susceptibilité accrue aux pathogènes...). Il conviendrait donc de disposer des méthodes de pilotage de la fertilisation azotée « au vignoble » permettant in fine l'efficience des apports d'azote, comme cela a déjà été entrepris pour l'eau.

Dans cet article, quelques points essentiels du fonctionnement de la vigne en termes de besoins azotés au cours des différents stades phénologiques vont être abordés. Il s'agit d'un schéma général de fonctionnement, vers lequel convergent les différents travaux de recherche, tout en restant soumis à discussions. La grande variété des pédoclimats, des modes de conduite (densité, charge, architecture…) et de variété, à laquelle s'ajoutent les stress environnementaux peuvent modifier ce schéma.

LE CYCLE ANNUEL DE LA VIGNE.

La figure 1 schématise la dynamique de croissance complexe et imbriquée des principales parties pérennes et annuelles de la vigne, en dehors de toute contrainte environnementale. L'interception des principales ressources du milieu en « carbone » et en « azote », ainsi que le métabolisme et la distribution des composés qui en résultent, dépendent de processus multi-factoriels. Certains de ces facteurs, comme la disponibilité en eau, la lumière, la température, la concentration de tel composé peuvent affecter, voire réguler, une multitude de réactions enzymatiques.

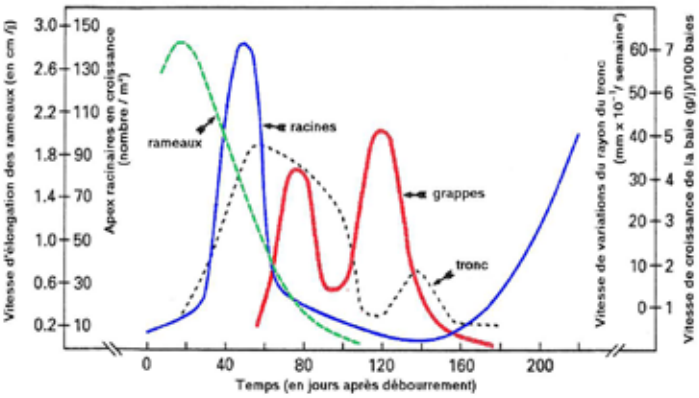

Figure 1 : Dynamique de croissance des principales parties d'un cep de vigne (d'après Williams et Matthews, 1990).

Après les mois de repos hivernal, la vigne va assurer simultanément jusqu'à la floraison, le développement et la croissance de ses organes végétatifs (tiges, feuilles, racines) et reproducteurs (inflorescences). A partir du débourrement, les feuilles et rameaux commencent à croître. Pendant leur croissance, les feuilles sont d'abord hétérotrophes (utilisation majoritairement des réserves), puis elles deviennent autotrophes vis-à-vis du carbone (utilisation des glucides issus de la photosynthèse). On considère que lorsque les feuilles atteignent la moitié de leur taille finale, leur activité photosynthétique devient excédentaire : d'organes « puits » (utilisateurs de réserves), elles deviennent alors organes « sources » (exportateurs de glucides). La plus grande partie de la croissance durant cette période débourrement-floraison s'effectue à partir des réserves, tant azotées que carbonées. Environ 2-3 semaines avant la floraison, on assiste à un basculement entre l'hétérotrophie et l'autotrophie (Zapata et al., 2004).

La source d'azote utile au développement et à la croissance des organes des plantes pérennes (comme la vigne), se fait à partir de deux processus : i) l'absorption racinaire, ii) la mobilisation de réserves azotées situées dans les structures pérennes que sont les racines et le tronc. Ces deux processus peuvent se dérouler en même temps ou être découplés dans le temps comme c'est le cas dans la première partie du cycle. La vigne, comme tous les ligneux, est un végétal très tributaire de ses réserves azotées (et carbonées), qui jouent un rôle crucial dans la croissance en début de cycle (Tromp, 1983 ; Loescher et al., 1990). La contribution (en %) de chaque compartiment (racines/tronc) aux réserves varie selon les auteurs : de 40/60 pour Wermelinger (1991), 65/35 pour Schreiner et al. (2006), à près de 80/20 Bates et al. (2002). Bien que les protéines soient utilisées, les réserves azotées sont préférentiellement constituées par des amino-acides qui sont la forme la plus économique de stockage (C/N faible). L'arginine est prédominante, représentant jusqu'à 60% de la quantité d'azote total. Les réserves carbonées sont quant à elles sous la forme d'amidon qui est stocké essentiellement au niveau des rayons parenchymateux des cellules des racines et représentent 1/3 de la masse sèche des racines (Zapata et al., 2004). 90% du stockage en amidon se fait dans les racines.

La figure 2 montre sur deux millésimes, l'évolution générale de la teneur en azote des différents compartiments d'un cep de vigne. Les ré-

serves azotées sont mobilisées à partir du débourrement et servent la croissance des feuilles, chez lesquelles la Rubisco, enzyme clé de l'assimilation du carbone, représente 50% des protéines solubles. Ces réserves décroissent ensuite plus ou moins régulièrement jusqu'à la véraison. Elles se reconstituent lors d'une reprise de l'absorption racinaire d'azote dans la dernière partie du cycle végétatif et lors de la remobilisation de l'azote des feuilles sénescentes. L'absorption maximale d'azote a lieu durant la période « post-floraison véraison » ; les feuilles, les rameaux et les grappes sont alors de forts puits pour l'azote. Un deuxième pic d'absorption se met en place à partir du retrait de la vendange.

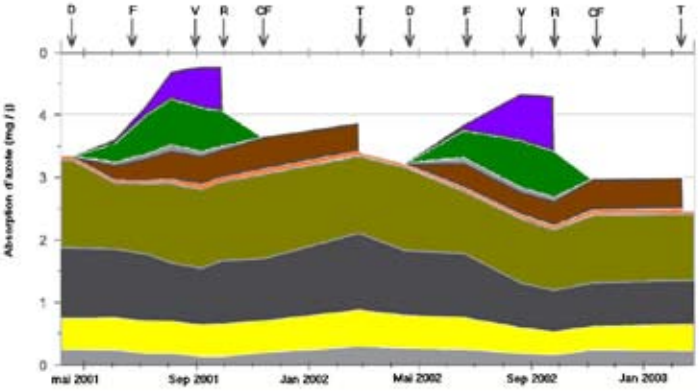

Figure 2 : Dynamique de la teneur en azote des différents compartiments d'un cep de vigne au cours de deux millésimes (Schreiner et al, 2006).
D : débourrement ; F : floraison ; V : véraison ; R : récolte ; CF : chute des feuilles ; T : taille.

Durant la période « véraison–maturité », l'absorption d'azote décline fortement. A partir de la véraison, les grappes deviennent de forts compétiteurs pour les photoassimilats. Les ceps avec grappes présentent généralement une diminution de la croissance non seulement des rameaux, mais aussi des racines, principalement les fines d'un diamètre inférieur à 2 mm, qui sont le siège de plus actif de l'absorption azotée. Il y a ainsi une distribution préférentielle des glucides néoformés aux grappes, diminuant par conséquent la distribution aux racines. L'absorption d'azote, mécanisme demandant beaucoup d'énergie, ne pourrait donc que stagner, voire se réduire. Des ceps sans grappe ne présentent pas un ralentissement aussi marqué. Par ailleurs, ce sont les racines fines (< 2mm) qui assureraient la plus grande part de l'absorption d'azote. Ces jeunes racines possèdent une capacité d'absorption racinaire bien plus efficace que celles plus âgées et de diamètre plus important. La quantification de la production de racines et de leur mortalité est difficile et reste controversée (Norby et Jackson, 2000). Sur 1 m de profondeur, on estime que 40% du système racinaire est remplacé chaque année (Lehnart et al., 2008). Ce taux peut être plus ou moins prononcé selon les travaux. La plasticité du système racinaire est d'ailleurs un gage d'adaptation (Volder et al., 2005). Cette plasticité permet à la plante d'une part de ne maintenir des racines que dans les zones de sols qui sont effectivement pourvoyeuses de nutriments (eau, azote…) et d'autre part d'ajuster le pool de racines aux besoins effectifs dictés par les parties aériennes sièges de la photosynthèse, moteur de la croissance. Quant au pool de racines mortes, il entre dans le turnover de la matière organique du sol.

Différents travaux montrent que l'absorption de NO3- par une partie du système racinaire peut être modifiée quand l'autre partie du système racinaire (1/4 ou 1/2 du système racinaire total) est soumise à un « stress azoté » (limitation de la fertilisation). Il y a une augmentation de 50% de l'absorption au sein du système bien alimenté, mettant en évidence une réaction de « compensation » au sein du système racinaire permettant de répondre à la demande en N des parties aériennes (Goutouly, 1995). Ce type de réponse peut résulter de 2 processus : (i) augmentation de la capacité d'absorption racinaire (vitesse d'absorption par unité de racine), (ii) stimulation de la croissance des zones racinaires bien pourvues, traduite par une augmentation de la masse sèche racinaire et du nombre de racines latérales. Le premier effet est spécifique au prélèvement en azote, tandis que pour le deuxième, la spécificité « azote » des modifications morphologiques du système racinaire est plus floue : les stress minéraux et même le stress hydrique produisent des effets similaires.

Dynamique de l'offre en azote du sol

Le sol est un milieu non uniforme et non isotrope où la forte variabilité spatiale et temporelle des propriétés hydrodynamiques et physico-chimiques rend leur description difficile à appréhender même sur sol nu. L'absorption de NO3- dépend de la concentration en NO3- de la solution du sol, du volume de sol exploité par les racines, de la densité racinaire et de capacités d'absorption de ces racines. Le flux de NO3- vers les racines dépend quant à lui de la qualité du contact sol-racine et de la teneur en eau du sol qui permet la diffusion du NO3- vers la racine. La disponibilité en azote dans le sol dépend de nombreuses transformations biologiques car résultant de l'action des microorganismes du sol sur les différentes matières organiques du sol, ou non biologiques (lessivage, volatilisation…). Ces mécanismes sont dépendants de divers facteurs physiques qui relèvent de la caractérisation du pédoclimat (température, humidité des sols, pluviométrie, taux d'argiles et de calcaire, pH, compacité des sols…). Il existe deux sources principales de NO3- dans le sol : i) la minéralisation de composés humiques, ii) l'application d'engrais minéraux contenant de l'azote facilement utilisable par la plante.

Dans un système de culture à bas niveau d'intrants comme la vigne, il est donc nécessaire de connaître assez précisément la dynamique saisonnière de la minéralisation des matières organiques du sol pour évaluer la fourniture en azote par le sol et ajuster en conséquence les modes de conduite. La fertilisation azotée étant fortement réduite voire absente en vignoble de qualité, l'estimation de la minéralisation de l'azote du sol doit donc être encore plus précise que pour les systèmes de culture conventionnels afin de réaliser des prévisions de déroulement du cycle végétatif et reproducteurs. Il existe différents outils, plus ou moins complexes, qui permettent, à des degrés divers de précision : (i) de quantifier la dynamique de minéralisation nette in situ de l'azote organique du sol durant une année calendaire au champ, et (ii) d'expliquer et de prédire cette minéralisation in situ dans la large gamme de pédoclimats et de viticulture.

Parmi ces outils, STICS, un modèle de culture adapté récemment à la vigne (Garcia de Corazar Atauri, 2007) permet de décrire le développement et la croissance de la vigne dans diverses situations de culture et de pédoclimats. En cours de développement, il est pour l'instant destiné à la Recherche. La figure 3 présente un exemple de modélisation de la minéralisation avec STICS pour deux millésimes distincts et pour une même parcelle. On constate l'extrême variabilité de la fourniture en azote tout le long de l'année, occasionnant en fonction des millésimes (caractérisés par leur bilan hydrique) des situations de carences azotées fortes ou à l'inverse une non limitation de cette fourniture. Les barres verticales de couleur représentent la date d'atteinte des 4 principaux stades phénologiques, calculée sur la somme de température en base 10°C : 80°C.j pour le débourrement, 400 °C.j pour la floraison, 1100 °C.j pour la véraison et 1500°C.j pour la récolte. La récolte n'est pas un stade phénologique à proprement parlé : 1500°C.j est une convention pour positionner cette étape. La forte dépendance des processus de minéralisation aux caractéristiques climatiques (pluviométrie et température) rend difficile le pilotage fin de la fertilisation de la vi-

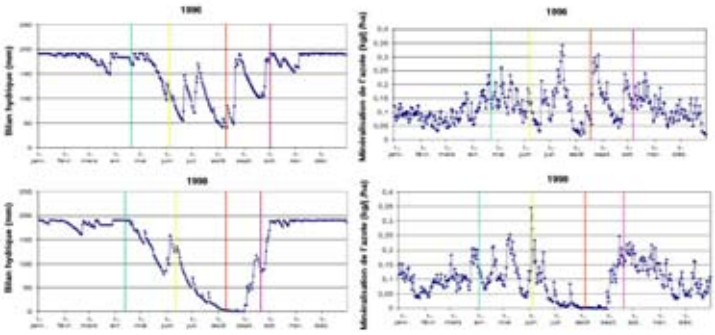

Figure 3 : Modélisation avec STICS vigne, de la dynamique de minéralisation de l'azote et du bilan hydrique sur une parcelle pour deux millésimes aux climats contrastés. (les barres verticales de couleur représentent les stades phénologiques, voir texte).

gne. La complexité du modèle STICS vigne fait qu'il reste pour l'instant un outil plutôt destiné à la recherche. D'autres modèles spécifiques à la viticulture sont en cours de développement, cherchant à donner à l'utilisateur un moyen de gestion de cette fertilisation. Ainsi le modèle développé par Nendel et al. (2004) permet, à partir d'un nombre limité de variables d'entrées de modéliser la dynamique de la minéralisation de l'azote. Outre la variabilité inter annuelle de la minéralisation, la figure 4 montre aussi la contribution des différentes couches de sols, avec comme attendu, la faible contribution des couches profondes (au-delà de 50 cm).

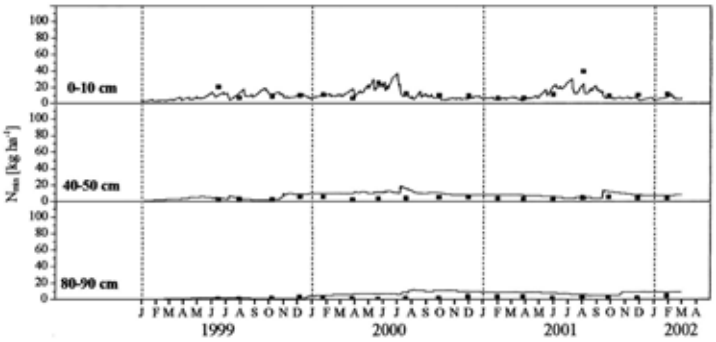

Figure 4 : Simulation de la teneur en azote de trois horizons de sols. (■) données mesurées ; (□) données simulées ;

Nutrition azotée et accumulation de composés azotés

Les données d'accumulation d'azote dans la baie de raisin sont très variables selon les auteurs, mais un schéma général peut être mis en évidence. Ainsi les travaux de Schaller (1999) montrent que l'azote s'accumule régulièrement dans la baie de raisin depuis la nouaison jusqu'à la récolte, passant d'environ 100 µg N /baie à 1800 µg/baie à la récolte. Par contre le taux d'accumulation diminue à partir du stade petit pois jusqu'à la véraison, passant de 50 µg/baie/jour à 5.5µg/baie /jour. Ce taux reste faible durant la période de maturation, jusqu'à la récolte, remontant légèrement en fin de période. Le fort taux d'accumulation correspond à la période de division cellulaire et de croissance de la baie après la nouaison. Par contre, rapportée en % de la matière sèche, la quantité d'azote diminue depuis la floraison (cf fig 5 ; Schaller, 1999).

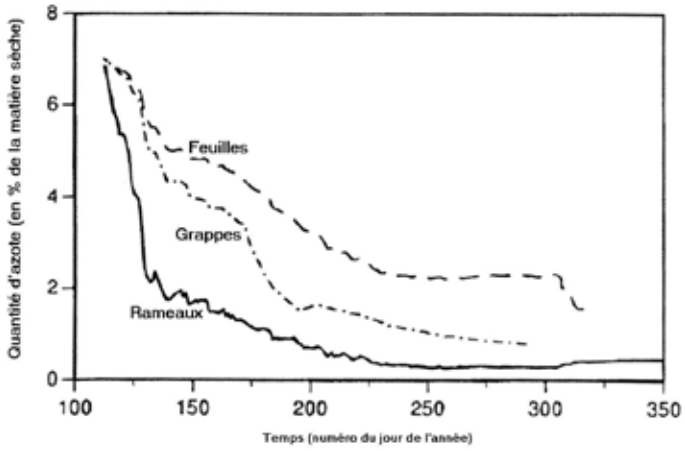

Figure 5 : a) dynamique de l'absorption d'azote au niveau de la baie (Schaeller, 1999) ; b) évolution de la teneur en azote des 3 principaux compartiments de la vigne (Wermelinger, 1991).

De nombreux travaux montrent un lien étroit entre la quantité d'acides aminés et le niveau de fertilisation, en absence de toute contrainte hydrique (cf fig 6).

L'alimentation azotée de la grappe dépend essentiellement de l'azote absorbé par les racines pendant la phase de maturation. Cependant, en situation de fort stress ou si la charge est trop importante, certains travaux montrent une participation des réserves azotées.

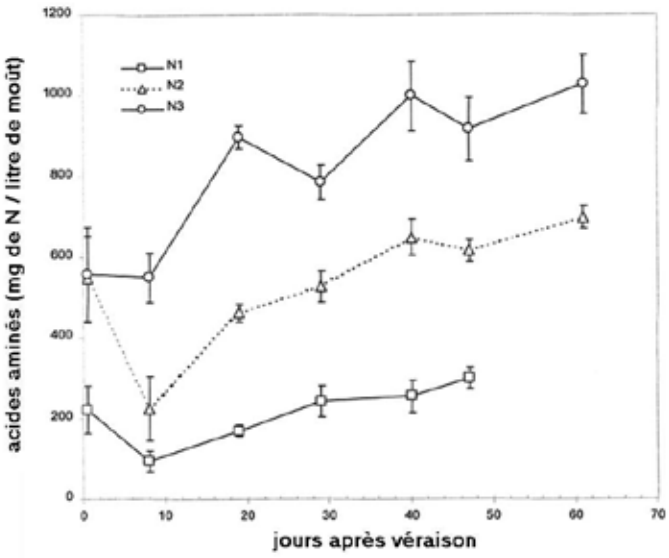

Figure 6 : Impact de la fertilisation azotées sur la teneur en acides aminés de baies de Merlot (Hilbert et al., 2003). N0 : 1.4 mM N1 : 3.6 mM N3 : 7.2 mM.

Nutrition azotée et métabolisme secondaire dans la baie

L'influence de la limitation de la nutrition azotée sur les teneurs en flavonoïdes et autres composés issus du métabolisme secondaire dans la baie, n'est plus à démontrer. Les enzymes clés de la voie du shikimate à l'origine de la phénylalanine, précurseurs de la voie des flavonoïdes et des lignines, sont régulées de façon post-transcriptionnelle par les acides aminés aromatiques et probablement aussi par le potentiel rédox issu de la photosynthèse (Lillo et al, 2008). Plus en aval de la voie du shikimate, la Phénylalanine ammonia-lyase (PAL) catalyse le premier composé de la voie des phenylpropanoïdes. Différents isoenzymes de cette PAL seraient à l'origine de différentes voies métaboliques, aboutissant soit aux anthocyanes, soit au kaempférol et ses glycosides, soit à la quercétine et ses glycosides.

De même des niveaux élevés d'alimentation azotée inhibent la synthèse des anthocyanes. Hilbert et al. (2003) montrent ainsi que les niveaux d'alimentation azotée influencent le type d'anthocyanes présents dans la pellicule des baies de Merlot. De faibles niveaux azotés favorisent la delphinidine 3-glucoside et la péonidine 3-glucoside et limitent les anthocyanes acylées. Inversement ces dernières sont favorisées lors de forts niveaux d'azote, limitant alors les anthocyanes non acylées. La quantité de malvidine 3-glucoside, est quant à elle peu affectée par les différents niveaux d'alimentation azotée. Un excès de vigueur modifie l'éclairement, la température et l'humidité ambiante de la zone des grappes. On sait par exemple que la lumière et la température ont un fort impact sur le métabolisme de la baie de raisin (revue de Bell et Henschke, 2005). Les faibles éclairements occasionnent une diminution des concentrations en sucres solubles, anthocyanes, terpènes et composés phénoliques totaux. Ils augmentent les concentrations en acides malique et tartrique et les taux de potassium. Les faibles températures augmentent l'acidité titrable et diminue le pH en augmentant notamment les quantités d'acide malique.

Lors de divers stress de nature biotique (agents pathogènes, blessure, symbiose) ou abiotique (lumière, rayonnements U.V., faible température, carences) les plantes mettent en place diverses réponses conduisant notamment à l'induction du métabolisme secondaire dont celui des phénylpropanoïdes. Ces composés ont de multiples fonctions chez les végétaux : protection contre les stress oxydatifs, protection contre les UV, signaux de communication, molécules de défenses contre les pathogènes… (revue de Wink, 1999). Leur production est soit constitutive, soit relevant d'une gestion du pool de carbone des feuilles, soit même induite par des stress biotiques ou abiotiques. Elle est stimulée par une faible nutrition azotée ou par de faibles éclairements, ce qui se traduit par le même résultat : une quantité surnuméraire de carbone par rapport à l'azote. Leur coût de fabrication par les cellules est très élevé (g glucides/g de comp. phénoliques), ce qui permet de stocker le carbone surnuméraire. De même dans le cadre des vins de cépages rouges, l'obtention d'un raisin de qualité réclame le maintien d'un fai-

ble niveau d'alimentation azotée. Ceci est généralement obtenu par contrainte hydrique ou azotée, via un enherbement maîtrisé ou le pilotage de la fertirrigation. C'est cette même voie des flavonoïdes qui est alors activée.

Le développement récent des outils de génétique quantitative et de génomique fonctionnelle apportent une masse énorme d'informations concernant les interactions génotype/milieux, interactions qui sont au cœur même de l'amélioration des plantes et de l'agronomie. Des travaux sur quelques plantes modèles, comme Arabidopsis thaliana, une crucifère choisie pour la petitesse de son génome, le premier d'une plante a avoir été séquencé (fin 2001), apportent de nombreux éclairages sur les interactions métaboliques et les impacts des facteurs du milieu sur ce métabolisme de la plante. La figure 7 montre un exemple des régulations de la voie de synthèse des composés phénoliques, qui sont qualitatifs pour la baie de raisin. La limitation d'azote, les forts éclairements et le saccharose jouent un rôle de régulation fine au niveau des transcrits de plusieurs enzymes de cette voie. La teneur en flavonoïdes augmente donc en situation de limitation azotée. Nous avons ici avec cette crucifère, la possibilité d'étudier une des voies les plus impliquées dans la typicité des vins, issus de terroirs déterminés. La dynamique de la constitution de la qualité de la baie tout le long du cycle de la vigne, trouve là ses premières bases génétiques et fonctionnelles, sachant que dans de cas de la vigne, plante greffée, nous avons à considérer la gestion de deux génomes en interaction, celui du cépage et celui du porte-greffe, avec une multitude de combinaison greffon/porte-greffe.

Fertilisation

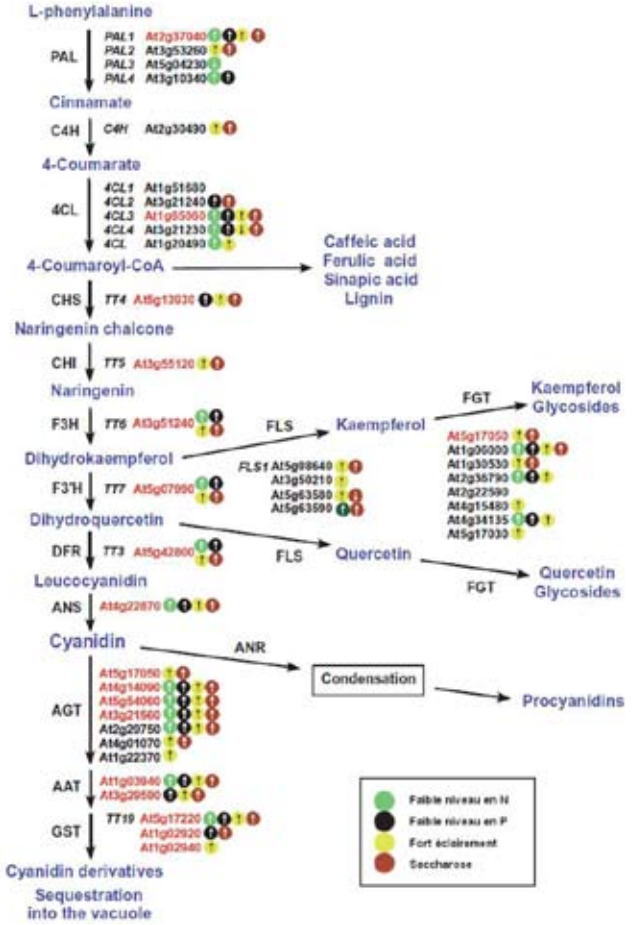

Figure 7 : Schéma simplifié des voies de synthèse des flavonoïdes et phénylpropanoïdes et de l'action des ressources du milieu sur les différents transcrits (Lillo et al, 2008).

Le raisonnement de la fertilisation azotée, comprenant les deux étapes clés que sont la détermination des phases du développement et les besoins en azote de la vigne au cours du cycle, doit avoir deux objectifs : i) prévenir des discordances entre valeur potentielle de prélèvement d'azote par la plante et valeur du flux d'azote disponible dans le sol, afin d'assurer un déroulement satisfaisant des différentes phases du cycle annuel, ii) assurer un équilibre physiologique garant d'une part d'une production régulière, définie et de qualité, et d'autre part de la pérennité du cep de vigne. Dans le cadre de la viticulture, ce raisonnement doit être conduit sur deux échelles de temps : i) celle sur l'année pour la production de fruits et de la charpente végétative, qui dépend à la fois du statut du pied de vigne (réserves carbonées et azotées), et de la fertilisation de l'année 'n' et 'n-1', ii) celle sur la vie du cep (pérennité) pour le maintien d'un équilibre de l'ensemble de la charpente ligneuse au rôle de soutien et de réserves de nutriments pendant de nombreuses années.

Pour être efficace, au printemps, la fertilisation azotée de la vigne, ne doit pas être trop éloignée du stade 3-5 feuilles étalées. Plus en amont, la plante n'a pas, comme nous l'avons vu, les capacités de prélevées cet azote et les risques des pertes par lessivage sont élevés. Cet apport doit être modulé en fonction du climat de l'année et des types de sols. En années ou en zones tardives, en sol filtrant, l'apport peut être retardé, alors qu'en années ou zones plus précoces, sous des climats secs ou sur sol peu filtrant, il peut être avancé (Conradie, 1986 ; Spring et al., 2003). Toute fertilisation à des stades plus précoces se révèle quasi inopérante.

Cette fertilisation de printemps ne doit pas être pratiquée dans le but de résoudre les problèmes de carence azotée des moûts de certaines vignes à la récolte. Une trop forte charge d'azote au printemps ne fera que dynamiser la vigueur de la vigne avec tous les préjudices connus : retard de maturité, ombrage des feuilles entrainant une baisse de composés phénoliques et microclimat favorable aux maladies (particulièrement Botrytis)… En effet, l'azote qui entre dans la baie de raisin est généralement issu de l'absorption estivale. Ce n'est pas parce qu'il y a de l'azote dans le sol au contact même des racines que celui-ci sera automatique absorbé. Les mécanismes qui sous-tendent l'entrée d'azote sont soumis à de grandes régulations métaboliques dont les deux principales sont la nécessité de glucides néoformés et les relations source-puits entre organes. Les grappes, forts puits pour les glucides, deviennent alors très prioritaires à partir de la véraison, réduisant d'autant le flux vers les racines. L'ensemble de ces relations est d'autant plus accentué par le climat de cette période est orienté vers la contrainte hydrique. La contrainte hydrique estivale a trois effets majeurs : i) une baisse de la mobilité du NO3- en situation de sols séchant, ii) un ralentissement des mécanismes de minéralisation, iii) une réduction de la croissance qui limite les besoins en azote. Tout concourt à limiter naturellement l'entrée d'azote durant la phase véraison-récolte.

La fertilisation ne doit pas être excessive. On dispose pour la contrôler de différents indicateurs « plantes » facilement utilisables que sont notamment le diagnostic pétiolaire ou sur limbe, à la floraison et/ou à la véraison (van Leeuwen et al., 2007 et ces actes-ci). Ces analyses, pratiquées sur pétioles ou limbes des feuilles matures prélevées sur les rameaux primaires permettent de mettre en œuvre les modes de conduites appropriés pour la maîtrise de la vigueur. Afin de ne pas fausser les résultats d'analyses, il ne faut pas prendre de feuilles issues de rameaux secondaires, feuilles qui sont plus riches en azote (jusqu'à 1/3 de plus).

Conclusion

La complexité du métabolisme de la vigne, plante pérenne conduite non pas à son maximum de production mais à un optimum, obtenu par instauration de stress modérés en eau et en azote, rend difficile un pilotage fin de cette fertilisation. A cette complexité, s'en ajoute une autre, et pas des moindres, celle de la gestion des deux génomes en interaction, greffon et porte-greffe. Les outils de biologie moléculaire apportent déjà beaucoup d'informations sur les interactions du métabolisme au sein de la plante ainsi que sur les impacts des facteurs du milieu sur celui-ci. Leur développement permettra sans nul doute de mieux connaître les dynamiques des principales interactions qui ont été rapidement décrites dans cet article.

Bibliographie sommaire

Bates T.R., Dunst R.M., Joy P. (2002). Seasonal dry matter, starch, and nutrient distribution in 'concord' grapevine roots. HortScience 37(2) : 313–316.

BELL S.J., HENSCHLE P.A. (2005). Implications of nitrogen nutrition for grapes, fermentation and wine. Aust. J. Grape. W. Res., 11 : 242-295.

CONRADIE WJ. (1986). Utilization of nitrogen by the grapevine as affected by time of application and soil type. South Afr J Enol Viticult . 7 : 76–83.

GARCIA DE CORTAZAR ATAURI I., 2007. Adaptation du modèle STICS à la vigne (Vitis Vinifera L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France. Thèse ENSAM, pp 292

GOUTOULY JP. (1995). Régulation de l'absorption de NO3- chez le pêcher. Etude en solution nutritive. Thèse. Nancy (FRA) : Institut National Polytechnique de Lorraine. 141p.

HILBERT G. SOYER J.P., MOLOT C., GIRAUDON J., MILIN S. AND GAUDILLÈRE J.P. (2003). Effects of nitrogen supply on must quality and anthocyanin accumulation in berries of cv. Merlot.Vitis,2, 69-76.

LEHNART R., MICHEL H., LÖHNERTZ O., LINSENMEIER A. (2008). Root dynamics and pattern of 'Riesling' on 5C rootstock using minirhizotrons. Vitis 47 (4), 197–200.

LILLO C., LEA U. S., RUOFF P. (2008). Nutrient depletion as a key factor for manipulating gene expression and product formation in different branches of the flavonoid pathway. Plant, Cell and Environment 31(5), 587-601.

LOESCHER W.H., MCCAMAANT T., KELLER J.D. (1990) Carbohydrate reserves, translocation, and storage in woody plant roots. HortScience 25, 274-281.

NENDEL C.; KERSEBAUM K.C. (2004).A simple model approach to simulate nitrogen dynamics in vineyard soils. Ecological Modelling 177. 1–15

NORBY R.J., JACKSON R.B. (2000). Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. New Phytol. 147, 3-12

SCHALLER K. (1999). L'influence des différents systèmes de labour du sol sur l'absorption de N, P, K, Mg, Ca et des composés organiques N par les baies du raisin pendant la croissance et le développement de la variété « Riesling blanc ». Bul. OIV., 72, 823(24), 603-629.

SCHREINER R.P., SCAGEL C.F., BAHAM J. (2006). Nutrient uptake and distribution in a mature 'pinot noir' vineyard. Horstcience 41(2) : 336-345

STEFANELLI D., GOODWIN I., JONES R. (2008).Minimal nitrogen and water use in horticulture: Effects on quality and content of selected nutrients. Food Res. Int. 43 : 1833–1843.

SPRING J-L ; RYSER J-P, SCHWAERZ J-J, BASCLER P., BERTSCHINGE L., HÄSELI A. (2003). Données de base pour la fumure en viticulture. Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic. Vol. 35 (4).

TROMP J. (1983) Nutrient reserves in root of fruit trees, in particular carbohydrates and nitrogen. Plant Soil, 71: 401–413.

VAN LEEUWEN C., TREGOAT O., CHONE X., GAUDILLÈRE J.-P., PERNET D. (2007). Different environmental conditions, different results : the effect of controlled environmental stress on grape quality potential and the way to monitor it.13th Australian Wine Industry Technical Conference 29 July– 2 August 2007, Adelaide, Australia.

VAN LEEUWEN C. (2010). Terroir : the effect of the physical environment on wine growth, grape ripening and wine sensory attributes. 273-315. In : Managing wine quality. Vol1 : Viticulture and wine quality. Ed. Brock University, Canada.

VOLDER A., SMART DR, BLOOM AJ, EISSENSTAT M. (2005). Rapid decline in nitrate uptake and respiration with age in fine lateral roots of grape : implications for root efficiency and competitive effectiveness. New Phytol. 165: 493–502

WERMELINGER, B. (1991). Nitrogen Dynamics in grapevine Physiology and Modelling. Int. Symp. Nitrogen in Grape & Wine, 23-31, Seattle, USA.

WINK M. 1999. Functions of plant secondary metabolites and their exploitation in biotechnology. Ann.plant rev. (3). 370 pp.

ZAPATA C, DELÉENS E, CHAILLOU S, MAGNÉ C (2004). Mobilisation and distribution of starch and total N in two grapevine cultivars differing in their susceptibility to shedding. Functional Plant Biology 31(11), 1127-1135.

INTÉRÊTS ET LIMITES DES DIFFÉRENTES FORMES D'AZOTES APPORTÉES AU SOL EN VITICULTURE

PASCAL GUILBAULT

Service Vigne & Vin, Chambre d'Agriculture de la Gironde, Vinopôle Bordeaux-Aquitaine,

BP 115 - 39, rue Michel Montaigne - 33 294 Blanquefort Cedex, p.guilbault@gironde.chambagri.fr

INTRODUCTION

L'azote est l'un des constituants majeurs des plantes. Il est naturellement présent dans le sol, mais c'est le seul élément minéral qui ne provient pas de la roche mère. Son assimilation par les racines de la vigne dépend principalement du stock de matières organiques du sol et de leurs vitesses de minéralisation. La fourniture en azote du sol est généralement suffisante pour couvrir les faibles besoins de la vigne que l'on peut estimer entre 20 et 30 kg d'azote par hectare et par an pour un rendement de 50 à 70 hL/ha. Cependant, dans le cadre du raisonnement de l'alimentation azotée de la vigne, il est nécessaire de veiller à la bonne gestion des matières organiques du sol. En situation de carence, les apports azotés au sol ne sont pas les seules réponses adaptées. La carence ou le manque de vigueur peuvent être également liés au mode d'entretien du sol, à des problèmes d'hydromorphie, de sécheresse, de compaction, ou de statut acido-basique. Ainsi, un enherbement trop concurrentiel peut limiter de façon trop importante l'alimentation en eau et en azote de la vigne et des conditions défavorables à la vie du sol peuvent freiner la minéralisation. Dans cet article, nous nous intéresserons néanmoins uniquement aux différentes formes azotées susceptibles d'être apportées au sol en viticulture et à leurs caractéristiques.

PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTÉE

L'azote, par son influence sur la vigueur, est l'élément minéral dont l'excès est le plus susceptible d'entraîner une baisse de la qualité du vin. Inversement, même si les carences sont assez rares, cet élément est celui dont l'insuffisance réduit le plus la croissance de la vigne et peut poser des problèmes de fermentation des moûts. Si une faible alimentation azotée est favorable au potentiel œnologique des raisins destinés à la production de grands vins rouges, pour la production de vins blancs secs aromatiques, sans être excessive, l'alimentation en azote doit être non limitante, comme cela a été montré sur le Sauvignon blanc (Choné, 2001). Cependant, l'objectif premier de la fertilisation azotée au sol est d'alimenter la vigne et non d'agir directement sur l'azote des moûts. Il n'y a d'ailleurs pas de relations fiables entre l'azote des limbes et l'azote des moûts ou la durée de fermentation (Guilbault, 2004). D'autres facteurs tels que l'alimentation hydrique ou les rendements peuvent perturber ces relations. Dans tous les cas, une fertilisation azotée est à envisager si le feuillage est anormalement clair ou si les rendements sont trop faibles.

AFNOR normalisation scinde les produits azotés en 2 grandes catégories, les engrais décrits dans la norme NFU 42-001 et les amendements organiques décrits par la norme NFU 44-051. Selon cette dernière normalisation, contrairement aux engrais, la concentration en azote d'un amendement ne peut dépasser 3 % de la matière brut du produit. La plante ne pouvant pas assimiler directement les matières organiques, ces dernières devront préalablement être décomposées et minéralisées par les phénomènes abiotiques et biotiques présents dans les couches supérieures du sol, pour aboutir à des éléments minéraux simples que la plante est en mesure de prélever. Cette minéralisation est notamment sous la dépendance des taux d'argile et de calcaire, de la température et de l'humidité du sol (MARY et al., 1999).

LES ENGRAIS AZOTÉS

Les engrais azotés sont les produits les plus concentrés en azote. Si leurs prix sont très fluctuants en raison de leur liaison avec le prix du pétrole, ces produits restent globalement les moins coûteux des différents fertilisants susceptibles d'être apportés pour la nutrition azotée. Leur composition et conditionnement facilite le pilotage de la fertilisation. Contrairement aux amendements organiques de masse, les engrais sont en effet calibrés et de composition homogène. Il est donc aisé, au moyen d'un épandeur bien réglé, d'apporter la dose azotée souhaitée. Cette dose peut même être modulée au sein de la parcelle dans le cadre d'une viticulture de précision. Les apports d'engrais peuvent également être fractionnés en plusieurs épandages dans le temps, être aisément enfouis, localisés sur le rang ou même pulvérisés en foliaire. Si la libération d'azote est rapide, elle n'est cependant pas pérenne. Ainsi, selon les types de fertilisants, de sols et de climats, la durée d'action de l'engrais sera de quelques semaines à quelques mois. Si les engrais sont les fertilisants les plus adaptés à une correction rapide des carences azotées par apport au sol, ils ne permettent donc pas une correction durable des carences. Parmi les contraintes pour l'utilisation des engrais chimiques de synthèse, il est également important de signaler leur caractère généralement très acidifiant et leur interdiction en agriculture biologique. De plus, une étude commandée par le Ministère de l'Agriculture recommande la mise en œuvre d'un plan de maîtrise de la fertilisation, comparable au plan Ecophyto 2018, qui pourrait prendre le nom d'Ecofertilisation 2020. Face aux incertitudes pesant sur l'industrie des engrais en France, cette étude préconise «d'orienter la filière agricole dans la direction d'une moindre dépendance de l'agriculture aux engrais minéraux» (GCL Développement Durable, 2010).

LES DIFFÉRENTES FORMES D'ENGRAIS AZOTÉS

• **L'azote nitrique (NO_3-).** C'est la forme directement assimilable par les racines. A noter qu'il n'y a pas de différences entre l'azote minéral issu de la matière organique et l'azote minéral apporté par les engrais. L'azote nitrique est très soluble et migre très rapidement. En effet, les nitrates ont la même charge électrique que celle du complexe argilo-humique et ne sont donc pas retenus par le sol. Sous cette forme, l'azote devra donc être apporté au moment où la vigne en a besoin. Apportés plus tôt, les nitrates seraient rapidement lessivés, surtout si les pluies sont abondantes. Ceci représenterait une perte pour la vigne, une dépense inutile pour le viticulteur et une source de pollution des nappes phréatiques. Pour que l'azote nitrique apporté soit assimilé par la vigne, il faut néanmoins que l'azote migre jusqu'au niveau supérieur du système racinaire situé selon le mode d'entretien du sol entre 15 et 30 cm de la surface. Selon Champagnol (Champagnol, 1984), la migration des nitrates serait égale à 2,5 fois la quantité d'eau reçue sur un sol lourd à 6,5 fois pour un sol léger. Ainsi, il peut être judicieux de fractionner les apports en sol sableux puisque après un cumul de 100 mm de pluie, l'onde maximale de concentration en nitrate du sol risque d'être devenue inaccessible à la majorité des racines.

• **L'azote ammoniacal (NH_4+).** Chargé positivement, contrairement aux nitrates, l'azote ammoniacal est peu lessivable. Il est peu prélevé par les racines et doit d'abord être transformé en azote nitrique, avant d'être assimilé. Cette réaction est relativement rapide dans le sol, il suf-

fira donc de l'apporter 15 jours à un mois environ avant la date prévue pour un apport nitrique.

• **L'azote uréique ($CO(NH_2)_2$).** L'azote uréique est un composé un peu plus complexe et doit d'abord être transformé en azote ammoniacal, puis en azote nitrique avant d'être assimilé par les racines de la vigne. Les formes uréiques sont d'un intérêt limité en viticulture, en apport au sol. Elles sont en revanche utilisées en fertilisation foliaire. En phase liquide, les formes uréiques, de même que les formes ammoniacales, comportent un risque de volatilisation sous forme de gaz ammoniac NH3 au moment de l'épandage ou au cours du processus d'hydrolyse de l'urée en ammoniaque.

Les différentes compositions des engrais azotés

Les engrais azotés peuvent être simples, associant une ou plusieurs formes d'azote, ou composés, en association avec d'autres éléments minéraux. Parmi les engrais simples, le sulfate d'ammoniaque contient exclusivement de l'azote sous forme ammoniacale tandis que l'ammonitrate par exemple, associe les formes nitriques et ammoniacales. Dans les engrais composés, l'azote peut être associé à différents éléments minéraux, notamment du phosphore et du potassium. Dans un objectif unique de correction azotée, le choix d'un engrais composé n'est généralement pas judicieux si les autres éléments sont bien assimilés. En outre, ces engrais sont plus coûteux.

Les différentes formulations d'engrais

La majorité des engrais sont présentés en granulés, formulation assurant une facilité d'épandage. Parallèlement aux granulés, des formulations liquides sont également disponibles. Souvent plus chers, les engrais liquides peuvent présenter un intérêt dans certaines situations, notamment en vigne enherbée pour la localisation de la fertilisation au moyen d'un pulvérisateur, afin que l'apport ne profite pas à l'herbe. Ils peuvent également être associés aux herbicides, supprimant un passage spécifique pour l'engrais.

Les engrais retards ou à libération progressive

Certaines formulations associent un enrobage ou un retardateur de nitrification permettant une libération progressive de l'azote. Cependant, aux doses employées en viticulture, les expérimentations conduites par la Chambre d'Agriculture de la Gironde de comparaisons de différents types d'engrais azotés «retards» avec l'ammonitrate n'ont pas permis de mettre en évidence des différences concernant l'alimentation azotée de la vigne et la qualité des raisins et des vins. Une explication pourrait être que quelque soit l'engrais, une part de l'azote passe sous forme organique par assimilation microbienne. Cette organisation de l'azote minéral est le processus inverse de la minéralisation. Il correspond à l'assimilation de l'azote minéral par les micro-organismes du sol qui absorbent préférentiellement la forme ammoniacale à la forme nitrique. MACHET et al. (2001) ont ainsi montré que la gestion de la fertilisation avait peu d'effets sur la quantité d'engrais organisée (15 à 20 kg d'azote dans leurs essais). Cette constante serait fonction de la disponibilité en carbone du système de culture. Compte tenu des doses d'azote apportées qui sont classiquement inférieures à 50 unités, les engrais retards ne semblent donc pas présenter d'avantages décisifs en viticulture.

Les engrais organiques

La totalité des éléments fertilisants des engrais organiques a une origine organique. Il existe 2 provenances possibles à l'azote organique. S'il est d'origine chimique, il s'agit de molécules organiques relativement simples qui libèrent dans l'année l'azote qu'elles contiennent. Elles ont un comportement du type de celui de l'urée et suivront les mêmes recommandations. S'il est d'origine biologique, animale ou végétale, il peut provenir de guano d'oiseaux ou de poissons, de sang desséché, de tourteaux végétal... Ces formes d'azote ne sont pas lessivables et peuvent donc être apportées n'importe quand. Elles se libèrent plus lentement, et progressivement au cours de l'année que pour un engrais azoté classique. Pour libérer l'azote qu'elles contiennent, les molécules organiques devront en effet être dégradées par les micro-organismes du sol.

Les engrais organo-minéraux

Les organo-minéraux sont des engrais simples azotés ou des engrais composés contenant à la fois des matières azotées organiques d'origine animale ou végétale avec au moins 1 % d'azote organique, et des matières fertilisantes minérales.

Les amendements organiques

L'apport d'azote sous forme d'amendements organiques est la plus dépendante du sol, puisque l'assimilation de l'élément ne peut se faire sous forme organique. Comme pour les matières organiques du sol, celles apportées pour la fertilisation devront être minéralisées pour que l'azote qu'elles contiennent puisse être assimilé par la vigne. Cette minéralisation n'est pas régulière. Elle dépend du type de matière organique et de l'activité biologique du sol. Si leurs coûts sont généralement nettement supérieurs aux engrais (tableau 1), l'intérêt de l'apport d'amendements organiques dépasse cependant largement la simple fertilisation azotée. En effet, les apports exogènes permettent de conserver ou d'améliorer le «patrimoine sol», en assurant son bon fonctionnement et évitant son appauvrissement en matières organiques. Cet objectif s'inscrit dans la démarche générale de viticulture durable et constitue un investissement à long terme. En relation avec les rôles fondamentaux des matières organiques (physiques, chimiques et biologiques), les apports peuvent être également liés à des objectifs spécifiques pour améliorer une particularité du sol : lutter contre l'érosion, les toxicités métalliques, entretenir la biomasse microbienne, améliorer la rétention en eau…

Tous les amendements n'ont pas le même effet sur le sol et la vigne. Pour maintenir un niveau d'humus correct dans les sols, l'apport d'amendements organiques d'origine végétale, contenant de la cellulose et de la lignine, est indispensable. Cependant, l'apport d'un produit très (trop) stable, comme la tourbe, augmentera certes le taux de carbone organique dosable au laboratoire, mais sera peu dégradé par les micro-organismes. Ce type de produit ne libèrera donc pas ou très peu d'azote. A l'opposé, les matières organiques d'origine animale libèrent plus rapidement leurs éléments minéraux dont l'azote et stimulent momentanément l'activité microbienne mais n'enrichissent pas durablement le sol en humus.

La libération de l'azote sera élevée pour les matières organiques fraîches à faible rapport Carbone sur Azote (C/N), à faible pour les matières organiques compostées. Les matières organiques à C/N très élevé peuvent provoquer le phénomène appelé «faim d'azote», pour imager le besoin en azote nécessaire à la décomposition de la matière organique. En effet, pour pouvoir dégrader les molécules carbonées de

Nom commercial	Type de fertilisant	Nombre d'unités d'N pour 100 kg	Prix du produit pour 100 kg € HT	Coût de l'unité N
Perlurée	Engrais minéral simple	46	34,90	0,76
Ammonitre 33	Engrais minéral simple	33	30,00	0,91
Sulfate d'ammoniaque	Engrais minéral simple	21	25,50	1,21
Nitrate de chaux	Engrais minéral simple	15	35,00	2,33
Nitrate de potasse	Engrais minéral composé	13	57,64	4,43
Felex Amon (Entec)	Engrais minéral composé avec retardateur de nitrification	10	50,36	5,04
Liquovigne FL 13	Engrais minéral composé liquide	3	78,00	26,00
Fertial 80 6,5-4,5-1,3	Engrais organique (granulés)	6,5	85,0	13,08
Guanito 6-15-3+2 Mg	Engrais organique (bouchons)	6	40,68	6,78
Magaline 3-6-12	Engrais organo-minéraux	3	36,0	12,0
Amendine	Amendement organique	2	30,00	15,00
Biofertil	Amendement organique	0,8	6,0	7,5
Compost UCVA	Amendement organique	1,3	1,2	0,92

Tableau 1. Teneur en azote et coûts de différents produits (source Coût des fournitures en Viticulture et Œnologie 2011)

l'amendement, la microflore du sol utilise l'azote de la solution du sol, le rendant indisponible pour les plantes. Si ce phénomène transitoire peut être préjudiciable au développement des cultures annuelles, il se révèle cependant moins prégnant pour la vigne, notamment si les matières organiques ne sont pas enfouies.

L'étude des cinétiques de minéralisation de l'azote peut être réalisée au laboratoire au cours d'incubation en conditions contrôlées dans un sol (norme XP U 44-163 concernant la cinétique C et N, publiée en début d'année 2010). Ces mesures permettent de classer les matières organiques entre elles. Cependant, la minéralisation réelle au champ peut différer notablement des résultats obtenus au laboratoire en conditions non limitantes.

Autres formes d'apports azotés

Les engrais verts

On parle généralement «d'engrais verts» pour une légumineuse ou une crucifère préalablement semée puis enfouie par un labour, au moment où elle devrait être fauchée. Plus généralement, tout retournement d'enherbement naturel ou semé génère une source pouvant être très importante d'azote (CROZIER, 2007), en raison de la minéralisation de la matière organique fraîche, mais également indirectement par le labour qui favorise l'accès de la microflore aux matières organiques du sol.

Sarments

La restitution des bois de taille constitue la première source de matières organiques des parcelles viticoles. A eux seuls, les sarments représentent 30 à 50 % des pertes annuelles en matières organiques. Le broyage des sarments permet ainsi de restituer de 300 à 600 kg d'humus par ha et par an qui participeront à la fourniture d'azote de la parcelle après leur minéralisation.

Conclusion

Les besoins de la vigne en azote sont faibles et généralement comblés par la minéralisation des matières organiques de la parcelle. Les risques de carences en viticulture sont ainsi plus limités qu'en culture annuelle intensive. Cependant, comme pour toute plante, l'absorption insuffisante d'un élément peut conduire à une baisse de rendement et à un affaiblissement des souches. La qualité des raisins et donc du vin peut en être fortement altérée. Lorsqu'un signe de carence apparaît, il convient de prendre rapidement des mesures de redressement. L'apport d'engrais minéral fournissant rapidement de l'azote assimilable à la vigne est alors à conseiller. Selon la sévérité de la carence, les contraintes de production, la période d'apport, le type de sol et d'entretien du sol, le matériel et le budget disponible, le choix se portera sur tel ou tel type d'engrais. Pour corriger durablement le problème, des apports d'amendements organiques devront être envisagés. La diversité et la complexité des produits du marché nécessitent une réflexion encore plus approfondie que celle du choix d'un engrais, bien que le pilotage des amendements organique reste encore aujourd'hui très empirique. Enfin, comme esquissé en introduction, il ne faut pas oublier que la carence peut être liée à un mauvais fonctionnement du sol et/ou des racines ou à une mauvaise conduite de la vigne et non à un manque de matières organiques dans le sol. Il convient donc d'optimiser le rapport sol - plante : décompactage en sol tassé, gestion de l'entretien du sol, gestion du rapport feuille - fruit…

Bibliographie

CHAMPAGNOL, F., 1984. Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale. 353p.

CHONE, X., 2001. Contribution à l'étude des terroirs de Bordeaux : Etude des déficits hydriques modérés, de l'alimentation en azote et de leurs effets sur le potentiel aromatique des raisins de vitis vinifera L. cv. Sauvignon blanc. Thèse de Doctorat Sciences biologiques et médicales, option Œnologie-Ampélologie, Université de Bordeaux II. 188p.

Forme N	Avantages	Inconvénients
Généralités sur les engrais	- Concentrés en azote - Transport facilité - Pilotage aisée des doses - Homogénéité des apports - Apports localisés aisés - Rapidité d'action - Permet d'atténuer l'effet dépressif de l'enherbement sur la vigne	- Plage d'apport réduite dans le cadre des arrêtés sur la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole (interdiction généralement du 1er juillet au 1er mars)
Engrais minéraux	- Coûts limités de l'unité azoté - Connaissance des libérations d'N	- Coûts fluctuants - Effet N à court terme - Forte acidification du sol - Encadrement législatif peu formalisé d'un point de vue environnemental - Interdit en Agriculture Biologique - Mis à l'index par le Grenelle de l'environnement
Azote ammoniacal (NH_4+)	- Fixé par le complexe adsorbant du sol	- Voie minoritaire d'adsoprtion de l'N par les plantes (20%) - Devient toxique pour la plante s'il y a accumulation dans les tissus - Risque de volatilisation
Azote nitrique (NO_3-)	- Forme la plus facilement absorbée (80%)	- Non retenu par le sol donc lessivable par les pluies (risque de pollution des nappes) si non consommé par la végétation ou réorganisé par les micro-organismes du sol - Risque augmenté en sol sableux, filtrant
N retard minéral	- Moins de lessivage des nitrates (intérêts dans sols sableux ou si forte pluviométrie)	- Plus chers que les engrais classiques - L'effet est peu probant aux doses usuelles qui restent limitées en viticulture
Engrais organo-minéraux	- Libération rapide et progressive de l'N	- Plus coûteux que les engrais minéraux
Engrais organiques	- Libération progressive de l'N - Utilisables en Agriculture Biologique	- Plus coûteux que les engrais minéraux

Tableau 2. Avantages / Inconvénients des différentes formes d'engrais

CROZIER, P., CHAUSSOD R., 2007. Incidence sur le sol, la vigne et les vins de chardonnay du retournement d'un gazon permanent en Bourgogne. AFPP, 20e conférences du COLUMA, Dijon, 11-12 déc 2007.

DELAS, J., 2000. Fertilisation de la vigne. Edition Féret. 160p.

GCL Développement Durable, 2010. Etat, perspectives et enjeux du marché des engrais. Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pèche. Janvier 2010. 94p.

GUILBAULT, 2004. Gestion de l'azote à la vigne et au chai. Synthèse d'expérimentation 2000-2003. Contrat de plan Etat-Région Aquitaine. Chambre d'Agriculture de la Gironde. Avril 2004. 24p.

IFV, CA66, 2010. Le coût des fournitures en viticulture et œnologie 2011. ed CA66. 120 p.

MACHET J.M., RECOUS S., LIMAUX F., 2001. Devenir de l'engrais azoté appliqué à une culture. Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée. 5e rencontres GEMAS COMIFER, Blois, 27-29 novembre 2001.

MARY, B., BEAUDOIN, N., JUSTES, E. MACHET, J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. European Journal of Soil Science, 50, 549-566.

Forme N	Avantages	Inconvénients
Généralités sur les matières organiques	- Large plage d'apport dans l'année - Libération progressive de l'N - Effet durable - Nombreux effets positifs liés aux rôles physiques, chimiques et biologiques des matières organiques dans le sol (structure, rétention en eau, fourniture de nombreux éléments minéraux, augmentation de la CEC, complexation des ETM, stimulation de l'activité biologique...)	- Faibles teneurs en N - Dose d'apport nécessaire importante - Coût d'achat, de transport et d'épandage - Coûts élevés ramenés à l'unité N - Inadapté pour correction ponctuelle - Effets non uniquement ciblés sur l'N - Effet durable : risque de sur-fertilisation N, de pollution - Apport azoté dépendant de la qualité de la minéralisation - Connaissance insuffisante de la composition de certaines matières organiques - Méconnaissance du fonctionnement des matières organiques selon les types de sol - Pilotage difficile
Matières organiques végétales fraîches	- Peu coûteux	- Contiennent peu d'N - Risque d'entraîner une faim d'N les mois suivants l'épandage - Difficulté d'épandage
Fumiers	- Utilisables en AB (si provenance d'élevage extensif)	- Compositions très variées en fonction de l'origine animale et de la quantité de paille ajoutée et du type de stabulation/produit hétérogène - Odeur - Hétérogénéité de certains produits - Difficulté d'épandage
Compost végétal	- Utilisable en AB - Fort potentiel humique - Existe sous forme bouchon pour faciliter l'épandage	- Faible libération d'N
Retournement de sol enherbé	- Permet de minéraliser la matière organique stockée par l'enherbement	- Quantité d'N difficilement mesurable - Relargage azoté pouvant être très important
Résidus de cultures (sarments)	- Absence d'apport exogène - Limite les pertes en matières organiques du sol	- Redistribution des matières organiques généralement un rang sur deux

Tableau 3. Avantages / Inconvénients des différentes formes d'apports organiques

IMPACT DE L'ENTRETIEN DU SOL SOUS LE RANG SUR LA TENEUR EN AZOTE DES MOÛTS

Christophe Gaviglio, Laure Gontier

Institut Français de la Vigne et du Vin - Pôle Sud-Ouest,

V'innopôle, BP 22, 81 310 Lisle sur Tarn, christophe.gaviglio@vignevin.com

Introduction

La filière viticole, pour s'adapter aux contraintes environnementales, doit se tourner vers des modes de production utilisant moins d'intrants, herbicides notamment. Anticipant ce mouvement, l'IFV teste depuis plusieurs années l'impact des techniques alternatives existantes ou innovantes. S'il est admis dans le vignoble de Midi-Pyrénées que l'enherbement dans l'inter-rang apporte de nombreux intérêts techniques et environnementaux, l'application des herbicides sous le rang est encore la pratique majoritaire. Pour se passer d'intrants chimiques sous le rang, le désherbage mécanique et l'enherbement sont les principales alternatives testées depuis 2006. Ces deux solutions perturbent le réseau racinaire de la vigne et son alimentation en azote de manière différente. L'action mécanique des outils sectionne les racines ou radicelles près des souches, sans permettre d'obtenir un résultat de désherbage permanent et constant tout au long de la saison. L'enherbement sous le rang, même s'il est effectué avec des semences sélectionnées, exerce une concurrence directe avec la vigne dans la zone de captage de l'azote. Les conséquences sur le rendement et la vigueur sont de mieux en mieux connues, même s'il s'agit de phénomènes évoluant avec le temps. Plus récemment, nous avons mis en place des essais de paillage sous le rang, qui ne perturbent pas directement le réseau racinaire mais qui modifient l'interface sol-atmosphère et donc le microclimat du sol. Voici une synthèse de l'impact de ces techniques sur la teneur en azote des moûts, regroupant un grand nombre d'essais.

Méthode

Les travaux présentés sont une synthèse des résultats sur l'azote assimilable que nous avons obtenus au travers d'essais implantés dans différentes situations depuis 2007. Le tableau 1 présente le nombre de mesures disponibles par cépage et par essai, ces essais n'ayant pas pour but spécifique d'étudier l'impact des techniques sur l'azote assimilable des moûts. La mesure était réalisée en complément des critères habituels de rendement et de vigueur.

Cépages / Essai	Fertilisation azotée enherbement	Banc d'essai semences	Enherb. sous le rang	Désh. méca	Paillage sous le rang
Auxerrois (AU)			61		
Cabernet F. (CF)					20
Colombard (CO)			42		
Duras (DU)					
Fer Servadou (FE)	9	96	48	3	
Merlot (ME)				12	
Négrette (NE)			44		
Sauvignon (SA)			5		

Tableau 1. Nombre de mesures disponibles par cépage et par essai

L'enherbement sous le rang

L'enherbement sous le rang est la technique ayant le plus d'impact sur l'alimentation en azote des baies. Nous pouvons cependant identifier un certain nombre de situations où cet impact est modéré. Il s'agit des parcelles et des années repérées par une flèche verte (figure 1). On retrouve la parcelle de Négrette (NE) pour 3 années successives, la parcelle de Duras (DU) en 2008 (qui en revanche est plus impactée les 3 années suivantes), et la parcelle de Colombard (CO) en 2011, qui a fait l'objet d'une expérimentation de correction de la carence azotée.

Cet impact important est la conséquence d'une concurrence directe pour l'azote exercée par l'enherbement. Elle s'exprime déjà au travers du rendement et de la vigueur puisque l'azote est utilisé pour la croissance du végétal. De plus, la minéralisation de l'azote organique est stoppée plus rapidement, de même que la disponibilité de l'azote minéral, dans le cas d'une vigne enherbée en raison de l'assèchement du sol plus rapide en période estivale (Gary, Célette ; 2009). La redistribution racinaire ne joue pas beaucoup non plus pour réduire la concurrence azotée car l'azote est contenu dans les horizons superficiels du sol.

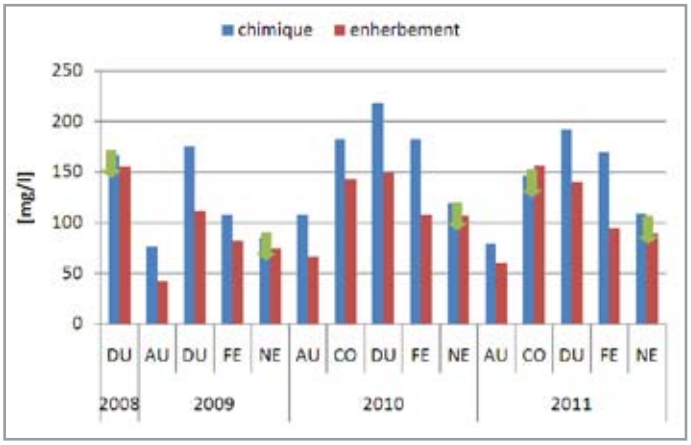

Figure 1. Impact de l'enherbement sous le rang sur la teneur en azote assimilable des moûts

Pourquoi certaines parcelles réagissent-elles différemment à cette contrainte azotée ?

Dans le cas de la parcelle de Négrette (NE), les enherbements semés ont un impact modéré et non significatif (Gontier, 2010), contrairement à la parcelle d'Auxerrois (AU) de Colombard ou de Fer Servadou (FE). Ces parcelles sont différenciées par le type de sol mais surtout par leur date de plantation. Les souches de Négrette ont une cinquantaine d'année et leur production est équilibrée, autour de 3 kg par souche. La parcelle d'Auxerrois, plantée en 2004, a un niveau de production situé entre 4 et 5 kg par souche. On peut formuler l'hypothèse que le réservoir d'azote minéral est plus sollicité sur des vignes jeunes et très productives pour la croissance et l'établissement du rendement. La consommation de l'enherbement, qui croît aussi avant la période de remplissage des baies, affaiblit aussi ce stock, dans une moindre mesure pour une vigne « à l'équilibre ».

Quels sont les moyens de correction disponibles ?

La correction d'une concurrence azotée excessive est possible par un apport d'azote minéral au sol uniquement dans le cas d'un mode de conduite associant l'enherbement sous le rang et travail du sol dans l'inter-rang, pour éviter qu'il ne profite qu'au couvert végétal. C'est le

cas de la parcelle de Colombard, sur laquelle une expérimentation a été mise en place en 2011. Dans cet essai d'apport azoté sur les différentes modalités enherbées (NATU, KOEL et FETUR) ainsi que sur les témoins désherbage mécanique (WSOL) et chimique (CHIM), la dose classique apportée est de 20 unités. La dose testée est 60 unités. Le graphique suivant (Figure 2) montre que l'apport de 20 unités permet aux modalités FETUR et KOEL d'être au niveau du témoin et que les 60 unités permettent d'être nettement au dessus. Le désherbage mécanique réagit bien également. En revanche, l'enherbement naturel est plus affecté.

On peut aussi envisager un apport d'azote foliaire à floraison de 15 unités pour les parcelles enherbées en totalité. Un essai sur Fer Servadou réalisé en 2011 a montré un gain en azote assimilable de 25 % par rapport au témoin.

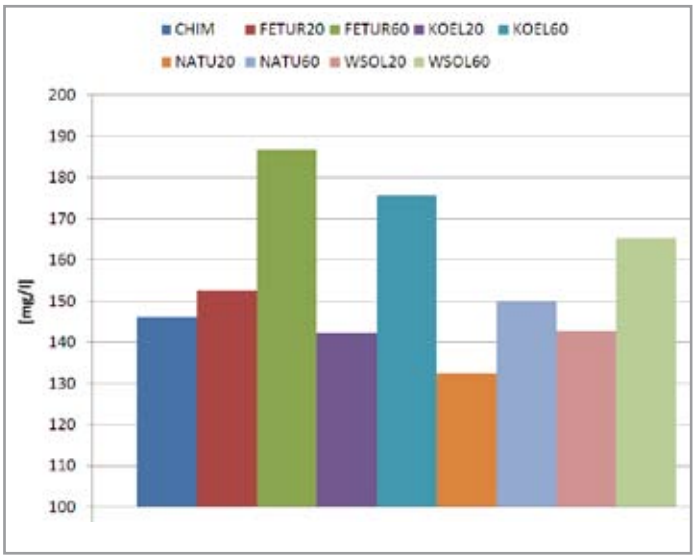

Figure 2. Impact de différents apports azotés associés à un enherbement sous le rang cépage Colombard - millésime 2011

Tous les enherbements ont-ils le même effet ?

Pour répondre à la problématique de moindre concurrence et de couverture du sol optimale, différents engazonnements ont été testés, avec des semences de graminées pures, en mélange ou associées avec des légumineuses pour bénéficier d'un éventuel retour d'azote. En 2010, des résultats intéressants ont été observés : l'association du trèfle blanc avec le dactyle ou la fétuque ovine par rapport à ces deux espèces seules a permis de relever les niveaux d'azote assimilable dans les mouts (Gontier, 2010).

Le désherbage mécanique

Nos essais ont montré que le désherbage mécanique sous le rang peut avoir un impact important sur le rendement et la vigueur lors d'une phase de transition à partir du désherbage chimique (Gaviglio, 2010). La perturbation plus ou moins importante du réseau racinaire et l'adaptation des parcelles à la mécanisation semblait en cause. L'alimentation en azote des baies pourrait aussi être perturbée car pendant la phase de maturation le sol est généralement plus difficile à travailler et il est possible d'avoir des pollutions adventices non maîtrisées au bon moment qui vont rentrer en concurrence. L'action du travail du sol sur la minéralisation de l'azote organique pourrait aussi avoir une incidence. L'observation des dosages d'azote assimilable montrent toutefois que, dans la majorité des situations, le désherbage mécanique n'entraine aucune baisse ni augmentation significative de ce paramètre. Reste la parcelle de Duras (DU) pour laquelle les 3 années de mesures (2009, 2010, 2011) montrent un réel problème d'alimentation azotée des baies. Il s'agit aussi de la parcelle la plus affectée sur les plans du rendement et de la vigueur en 2009 et 2010, alors qu'un rééquilibrage est observé en 2011. La parcelle la plus semblable (densité, porte-greffe, mode de conduite, climat et sol identiques) est la parcelle de Fer Servadou (FE). Alors pourquoi cette différence de comportement vis-à-vis de l'azote assimilable ? On peut formuler l'hypothèse que le besoin initial (et donc la consommation) en azote de la plante avant le chargement des baies est différent, mais cela est contredit par les mesures de rendement et de vigueur comparés entre Fer et Duras.

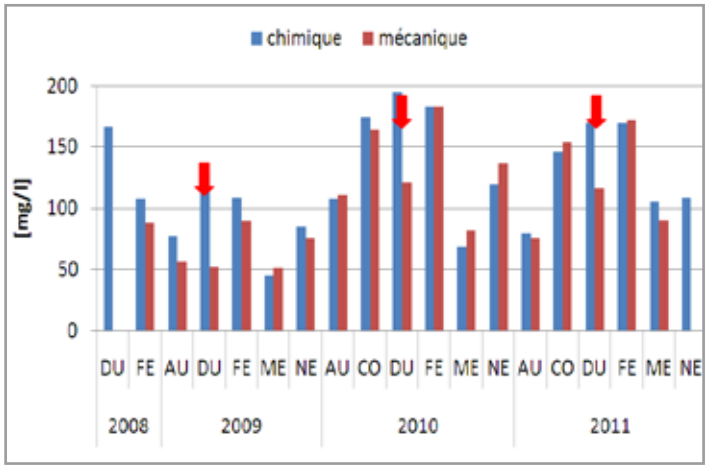

Figure 3. Impact du déserbage mécanique sur la teneur en azote assimilable des moûts

Le paillage sous le rang

L'impact potentiel de la couverture du sol par un paillage est un meilleur maintien de l'humidité, avec pour conséquence de favoriser la minéralisation de la matière organique. En revanche, la dégradation de paillages d'origine végétale consomme une partie de l'azote du sol. Les tanins contenus dans l'écorce de châtaignier sont susceptibles d'avoir un impact sur la microbiologie du sol. Dans le cadre de cet essai, réalisé sur une parcelle conduite en AB, la référence est le désherbage mécanique. Les résultats (figure 4) vont dans le sens d'une teneur en azote assimilable très basse sur toutes les modalités. L'impact est nul avec la paille de chanvre (CHAN), l'écorce de châtaignier (CHAT) ou le feutre (FEU), alors qu'une légère augmentation est notée avec la paille de lavande (LAV), et la paille de céréales (PAIL), pour les deux années de suivi. Ces deux dernières modalités sont celles qui se sont le plus dégradées.

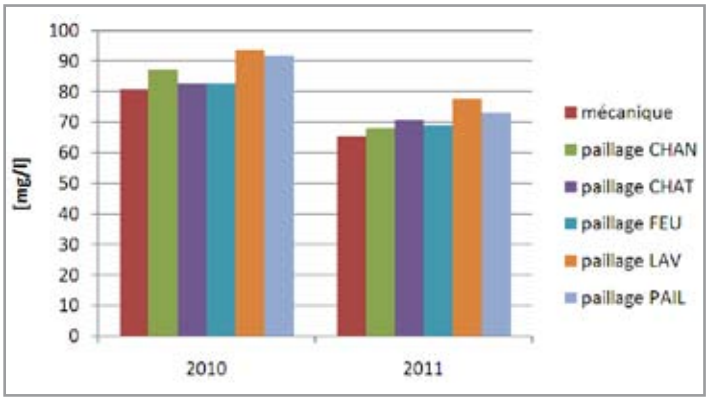

Figure 4. Impact de différents matériaux utilisés en paillage sur la teneur en azote assimilable - cépage Cabernet Franc - millésime 2010 et 2011

Conclusion

L'ensemble des observations du réseau de parcelles utilisé montre que les alternatives au désherbage chimique sous le rang n'ont pas toutes le même effet sur l'azote assimilable des moûts. Si le désherbage mécanique peut s'avérer perturbateur pour le rendement, dans la majorité des cas cela n'a pas préjudiciable pour l'accumulation de l'azote dans les baies. Pour aller plus loin, et notamment pour comprendre le fonctionnement atypique de certaines parcelles, une observation du sol avec analyses serait pertinente. L'enherbement sous le rang est plus impactant sur ce paramètre, mais il existe des solutions de compensation, soit par le travail du sol dans l'inter-rang et une fertilisation au sol, soit par une fertilisation foliaire à véraison. La contrainte azotée semble aussi beaucoup moins marquée pour les parcelles « âgées »

que pour les parcelles jeunes, et elle peut être limitée par le choix des espèces implantées sous le rang, toujours moins concurrentielles que l'enherbement spontané. L'impact des paillages sous le rang est moins évident à décrire avec seulement deux années de suivi, mais ils paraissent avoir peu d'effet.

BIBLIOGRAPHIE

Gary C., 2009.Enherbement et gestion du stress hydro-azoté de la vigne, Journée technique IFV Pulvérisation et entretien du sol en viticulture durable

Gaviglio C., 2010. Impact technico-économique du désherbage mécanique sou le rang de vigne, synthèse de 5 années d'essais, COLUMA.

Gontier L. 2010., Entretien du sol : les alternatives au désherbage chimique, conférence VINITECH SIFEL.

Primé aux Trophées de l'Innovation au **VINITECH 2010**

VINITECH SIFEL CITATION 2010

Contact et renseignements
IFV Sud-Ouest - V'innopôle - BP22 - 81310 LISLE SUR TARN
Tel. 05 63 33 62 62 - Email. christophe.gaviglio@vignevin.com

LES MÉTHODES D'ESTIMATION DE L' ALIMENTATION AZOTÉE DE LA VIGNE ET DES RAISINS AU VIGNOBLE :

ÉTAT DE L'ART

Cornelis (Kees) van Leeuwen et Philippe Friant

ENITA de Bordeaux, UMR EGFV, Institut des Sciences de la Vigne et du Vin
33140 Villenave d'Ornon, k-van-leeuwen@enitab.fr

Introduction

Parmi les éléments que la vigne prélève dans le sol, l'azote est celui qui influence le plus fortement son développement végétatif et reproducteur. Les besoins en azote de la vigne sont faibles. En effet, la vigne consomme entre 20 et 70 kg d'azote par hectare et par an (Delas, 2010), en fonction de la vigueur et du rendement. Seulement une faible fraction de ce prélèvement est exportée dans les raisins (une dizaine de kg/ha/an). Dans de nombreuses situations, la minéralisation de la matière organique du sol est capable de fournir cette quantité d'azote et une fertilisation azotée spécifique n'est pas toujours nécessaire.

La dynamique de stockage et d'absorption est particulière et différente de la plupart des autres éléments. La très grande majorité de l'azote présent dans le sol est stockée sous forme organique. Sous cette forme l'azote n'est pas disponible pour la vigne. La matière organique est minéralisée par la microflore du sol. Cette minéralisation va libérer de l'azote minéral (NH4+, transformé ensuite en NO3-). Ces deux formes d'azote peuvent être absorbées par la vigne. Le sol stocke très mal l'azote minéral. La vigne dépend donc, en grande partie, des quantités d'azote qui sont libérées par la minéralisation de la matière organique (en dehors d'un éventuel apport d'azote par la fertilisation). Les principaux paramètres du sol qui régissent les quantités d'azote minéralisées sont :

- la quantité de matière organique stockée dans le sol,
- les facteurs qui conditionnent sa vitesse de minéralisation :
  - le rapport C/N de la matière organique, qui indique sa richesse en azote,
  - la température du sol,
  - l'aération du sol,
  - le pH du sol,
  - la teneur en eau du sol,
  - l'abondance de la microflore du sol et la répartition des espèces de micro organismes présents.

La quantité d'azote absorbée par la vigne dépend de la fourniture par le sol et de la fertilisation azotée, qui peut être organique ou minérale. Cette fertilisation peut être relativement importante dans les vignobles du nouveau monde ou dans les vignobles européens hors zone d'appellation. Elle est généralement faible, voire absente, en vignoble de cru en Europe.

La grande majorité des travaux concernant l'alimentation en azote de la vigne est basée sur des essais de fertilisation et proviennent d'équipes travaillant dans les vignobles du nouveau monde (Californie, Washington State, Afrique du Sud, Australie). Dans ces études, différents niveaux d'apport d'azote (souvent en quantité très importante) sont comparés. Les auteurs considèrent généralement que le niveau d'alimentation en azote souhaitée est l'absence de contrainte, en évitant cependant d'apporter des quantités d'azote excessives. Il faut replacer ces travaux dans le contexte d'une viticulture en l'absence de contrainte environnementale. Les résultats ne sont pas transposables à la viticulture de cru européenne où l'intérêt d'un facteur limitant l'expression végétative de la vigne est admis de longue date.

En vignoble de cru, en l'absence d'une fertilisation azotée importante, la disponibilité de l'azote dépend fortement du type de sol. Si des travaux approfondis ont été réalisés sur l'effet de l'entretien du sol sur la nutrition azotée de la vigne (Soyer et al., 1995), il est étonnant de constater que très peu de travaux aient été consacrés à l'étude du niveau de l'alimentation en azote de la vigne et à son incidence sur le potentiel œnologique du raisin en fonction du type de sol, autrement dit le rôle de l'azote dans l'effet terroir.

Pour entreprendre ce type d'investigation, il est nécessaire de disposer d'un ou plusieurs indicateurs de l'alimentation en azote qui soient à la fois fiables, sensibles et de préférence faciles à mettre en œuvre. La nutrition azotée peut être raisonnée soit à partir d'analyses de sol (c'est-à-dire la disponibilité en azote), soit à partir d'analyses réalisées sur des organes de vigne (c'est-à-dire les quantités d'azote réellement absorbées), soit à partir d'appareils de mesure optique.

Évaluation des conditions d'alimentation en azote de la vigne par des analyses de sol

La nutrition azotée de la vigne a été suivie sur trois sols de la région de Saint-Émilion : un sol très graveleux (PEYROSOL), un sol sableux avec une nappe d'eau à portée des racines (LUVISOL sableux rédoxique) et un sol à sous-sol très argileux (PLANOSOL sédimorphe). Des analyses ont été réalisées pour mesurer le taux de matière organique et la teneur en azote du sol (tableau 1). Seules les données sur les horizons qui contenaient de la matière organique ont été reprises dans le tableau. Il est possible de doser l'azote minéral dans le sol. Cependant, sa teneur varie constamment au cours de la saison, en fonction de l'intensité de l'activité de minéralisation de la microflore du sol et de l'absorption par la vigne, ce qui impose de nombreuses mesures au cours de la saison pour permettre l'interprétation des données. Seul l'azote total (en majorité sous forme organique) peut être dosé en routine, car sa teneur ne varie pratiquement pas au cours de la saison. Il faut signaler que les valeurs d'azote total du sol peuvent être très variables en fonction du prélèvement.

De ces analyses, on pourrait conclure que l'alimentation en azote de la vigne serait la forte sur le sol argileux, qui contient à la fois le pourcentage de matière organique le plus élevé dans l'horizon de surface et une quantité d'azote total plus élevée sur l'ensemble du profil que le sol sableux. Des mesures de la teneur en azote sur les différents organes de la vigne (limbe, pétiole, baies de raisin) montrent au contraire que l'absorption d'azote par la vigne est la plus faible sur le sol argileux. Pour comprendre cette apparente contradiction, il faut avoir recours à des analyses microbiologiques (tableau 2). Dans le sol argileux, qui est froid, compact et mal aéré, l'activité microbiologique est faible. Par conséquent, les quantités d'azote minéral libérées sont faibles. Ceci explique que la vigne absorbe peu d'azote sur ce sol, malgré un stock d'azote total important. Cet exemple montre la difficulté de raisonner la nutrition azotée de la vigne à partir d'analyses de sol. Il est indispensable de compléter les analyses chimiques avec des analyses microbiologiques pour comprendre la dynamique de l'alimentation en azote de la vigne à partir d'analyses de sol, ce qui alourdit considérablement la démarche.

Sol graveleux				
Profondeur	**0-20**	**20-55**	**55-95**	**Total**
Poids terre brute/ha (T)	3000	5250	6000	14250
% élements grossier	50%	46%	65%	
Poids terre fine/ha (T)	1500	2835	2100	6435
% matière organique	1,92%	1,24%	0,66%	
Quantité matière organique (kg)	28800	35154	13860	77814
Azote total (%)	0,093%	0,074%	0,033%	
Azote total (kg)	**1395**	**2098**	**693**	**4186**
Sol sableux				
Profondeur	**0-45**			
Poids terre brute/ha (T)	6750			**6750**
% élements grossier	0%			
Poids terre fine/ha (T)	6750			**6750**
% matière organique	0.91%			
Quantité matière organique (kg)	61425			**61425**
Azote total (%)	0.050%			
Azote total (kg)	**3375**			**3375**
Sol agileux				
Profondeur	**0-20**	**20-30**	**30-60**	**Total**
Poids terre brute/ha (T)	3000	1500	4500	**9000**
% éléments grossiers	4%	40%	0%	
Poids terre fine/ha (T)	2880	600	4500	**7980**
% Matière organique	2.13%	0.76%	0.42%	
Quantité matière organique (kg)	61344	4560	18900	**84804**
Azote total (%)	0,095%	0,048%	0,021%	
Azote total (kg)	2736	288	945	**3969**

Tableau 1. Teneur en matière organique et en azote total de trois sols de la région de Saint-Emillion

La qualité du vin produite est moyenne sur le sol sableux, très bonne sur le sol graveleux et excellente sur le sol argileux. On peut donc noter au passage qu'il n'y a pas de relation simple entre l'activité microbiologique du sol et la qualité du vin produit, contrairement à ce qu'affirment certains auteurs (Bourguignon, 1995).

Indicateurs de la vie microbiologique	Sol graveleux	Sol sableux	Sol argileux
Biomasse microbienne (mgC:kg de terre)	117	95	71
Indice d'Activité Microbienne (IAM)	0.05	0.045	0.026
N minéralisé en 28j au laboratoire (mg/kg)	14.8	12.6	7.4

Tableau 2. Indicateurs de la vie microbiologique du sol de trois sols de la région de Saint-Emilion (laboratoire LCA - Chambre d'Agriculture de la Gironde, 33290 Blanquefort)

Évaluation des conditions d'alimentation en azote de la vigne par des analyses sur le végétal

Face à la difficulté de raisonner l'alimentation en azote de la vigne à partir d'analyses du sol, l'azote a été dosé dans différents compartiments du végétal : le moût de raisin à mi-véraison et à maturité (azote assimilable par les levures et NH4+), le pétiole à la mi-véraison et le limbe à la mi-véraison. Les valeurs indiquées dans la figure 1 représentent des moyennes obtenues sur 8 millésimes (2004 à 2011) et deux cépages (Merlot et Cabernet franc). Tous les indicateurs testés permettent de différencier la nutrition azotée de la vigne sur les sols étudiés et ce de manière hautement significative ($p < 0,001$). Cependant, la teneur en azote du limbe à mi-véraison, la teneur en azote assimilable du moût à mi-véraison ainsi que la teneur en NH4+ du moût à mi-véraison ne permettent pas de différencier le statut azoté de la vigne sur le sol graveleux et le sol sableux. Le teneur en azote du pétiole à mi-véraison, la teneur en azote assimilable du moût à maturité et la teneur en NH4+ du moût à maturité indiquent que l'alimentation en azote est la plus forte sur le sol graveleux, la plus faible sur le sol argileux et intermédiaire sur le sol sableux. Il n'avait pas été possible d'obtenir ce résultat à partir d'une analyse chimique de sol. Cet exemple montre l'effet déterminant des conditions de minéralisation sur la nutrition azotée de la vigne. La teneur en azote total est moyenne dans le sol graveleux, mais la minéralisation de la matière organique est rapide sur ce sol chaud et bien aéré. Par conséquent, l'alimentation en azote de la vigne est plus forte sur ce sol en comparaison avec les deux autres. En revanche, la teneur en azote total est forte sur le sol argileux, mais la minéralisation de la matière organique est lente dans ce sol froid et mal aéré.

Il faut noter que la teneur en azote assimilable du moût est plus élevée à maturité qu'à la mi-véraison (figure 2). On observe une dynamique inverse pour le cation NH4+. Pour l'interprétation des valeurs, il est donc important de bien préciser le stade auquel les analyses ont été effectuées. Les analyses du pétiole et du limbe sont le plus couramment effectuées à la mi-véraison, alors que les analyses du l'azote du moût (et azote assimilable) sont le plus couramment effectuées à maturité. Le dosage de l'azote assimilable à maturité présente l'avantage d'être à double fin : le résultat donne à la fois une indication sur le statut azoté de la vigne et sur la fermentiscibilité du moût. Il est important de signaler qu'il ne faut pas confondre ces deux objectifs lors de l'interprétation des résultats. Un moût avec une teneur en azote assimilable inférieure à 150 mg N/L doit être supplémenté pour éviter des problèmes de fermentation. En revanche, une teneur en azote assimilable inférieure à 150 mg N/L n'indique pas forcément un problème viticole, à condition que la vigueur et le rendement soient suffisants. Bien au contraire, pour la production de vins rouges de garde un statut azoté modérément faible est plutôt un atout, car il limite la taille des baies et la sensibilité à Botrytis cinerea et augmente la teneur en composés phénoliques des raisins (Choné et al., 2001).

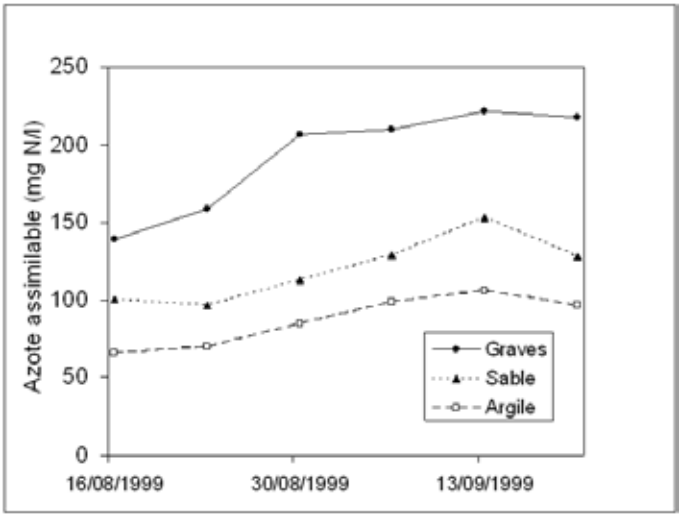

Figure 2 – Evolution de l'azote assimilable du moût sur trois sols de la région de Saint-Emilion, en 1999, de la véraison à la maturité (cépage Merlot).

Dans ce travail, l'azote assimilable a été dosé par formol titration (Masneuf et Dubourdieu, 1999). Aujourd'hui, cette analyse se fait de plus en plus fréquemment par Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier (IRTF). Cette dernière méthode donne des résultats beaucoup moins précis et cette approche peut remettre en cause la validité de l'azote assimilable du moût comme indicateur du statut azoté de la vigne. Certains laboratoires proposent aujourd'hui le dosage de l'azote alpha aminé. La somme de l'azote alpha aminé et de l'azote ammoniacal se rapproche de la valeur de l'azote assimilable et leur détermination est plus précise que le dosage de l'azote assimilable par IRTF. L'azote total du moût est également un très bon indicateur du statut azoté de la vigne (van Leeuwen et al., 2000), qui est par ailleurs bien corrélé à l'azote assimilable (figure 3). Cependant, la difficulté de sa mesure, qui nécessite une attaque acide qui produit beaucoup de mousse en présence de sucre, rend peu pratique sa détermination.

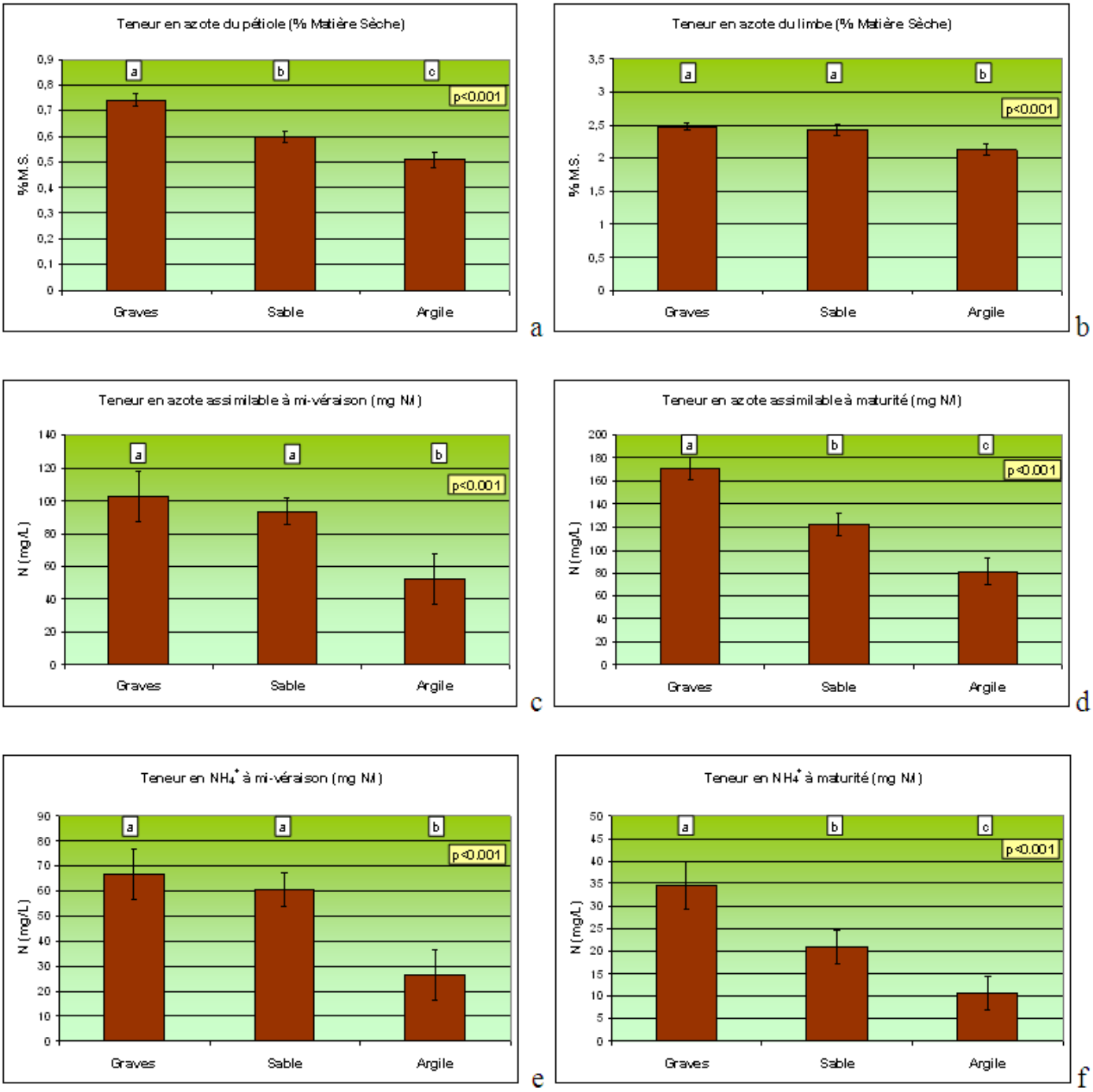

Figure 1 – Teneur en azote total du pétiole à mi-véraison (a), du limbe à mi-véraison (b), de l'azote assimilable du moût à mi-véraison (c) et à maturité (d) et de NH4+ du moût à mi-véraison (e) et à maturité (f) sur trois sols de la région de Saint-Émilion (moyennes 2004 – 2011 sur Merlot et Cabernet franc). Une valeur qui porte une lettre différente (a, b ou c) est statistiquement différente (ANOVA suivi de test de Newman et Keuls).

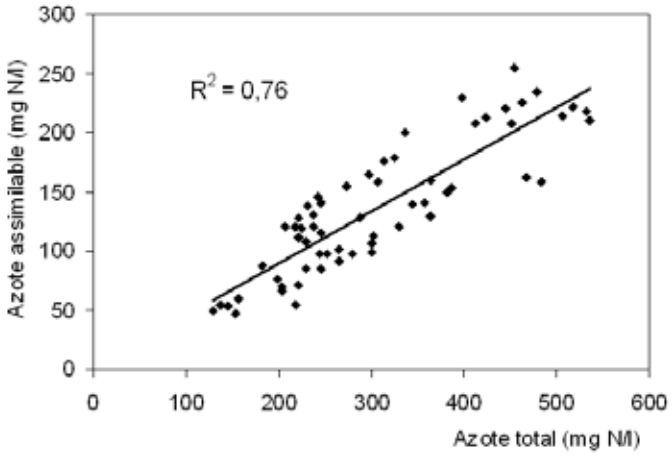

Figure 3 – Evolution de l'azote assimilable du moût sur trois sols de la région de Saint-Emilion, en 1999, de la véraison à la maturité (cépage Merlot).

Il est difficile d'établir avec précision des normes d'interprétation pour la teneur en NH4+ et en azote assimilable du moût en relation avec le statut azoté de la vigne car on observe un effet cépage important. Dans des conditions de sol, de climat et de culture identiques, les moûts du cépage Cabernet franc sont toujours plus pauvres en azote que ceux du cépage Merlot (figures 4a, 4b, 4c, 4d). Par ailleurs, on a également observé un effet du rendement : la teneur en azote du moût diminue avec le rendement par effet de dilution (Trégoat et al., 2002). On constate par exemple souvent de très faibles teneurs en azote assimilable dans les moûts d'Ugni blanc en Charente, qui sont plus à mettre en relation avec de forts rendements, qu'avec un statut azote déficitaire de la vigne. Il reste cependant possible d'indiquer des ordres de grandeur pour des vignes dont le rendement su situe entre 5 et 10 T / ha.. Une teneur en azote assimilable à maturité inférieure à 50 mg N/L indique une très faible alimentation en azote de la vigne, une teneur entre 50 et 100 mg N/L une faible alimentation en azote et une teneur entre 100 et 150 mg N/L une alimentation en azote faible à moyenne. L'alimentation en azote est moyenne à forte entre 150 et 200 mg N/L, forte entre 200 et 250 mg N/L et très forte au-delà de 250 mg N/L. Il

n'est pas forcément nécessaire de viser une alimentation en azote « moyenne ». En effet, il existe des situations où une faible alimentation en azote constitue un facteur limitant favorable au potentiel qualitatif, en particulier pour la production de vins rouges de garde. Il est inutile (et même déconseillé) d'effectuer une fertilisation azotée dans ces situations, sauf si une trop faible vigueur et rendement ne permettent pas la pérennité et la viabilité économique de la culture de la vigne. L'effet cépage est beaucoup plus faible sur l'azote du pétiole et du limbe (bien que statistiquement significative, figures 4e et 4f). Il est donc plus facile d'établir des normes d'interprétation pour ces derniers. On considère qu'une teneur en azote totale « normale » se situe entre 0,4 et 0,6% de Matière Sèche (MS) dans le pétiole et entre 1,8 et 2,4% dans le limbe à mi-véraison.

Évaluation des conditions d'alimentation en azote de la vigne par un appareil optique : le N-tester

Le N-tester est un appareil optique qui mesure l'intensité de la coloration verte du limbe. Celle-ci dépend de la teneur en chlorophylle de la feuille, elle-même en relation avec la nutrition azotée de la vigne (Spring 1999). Les performances de cet appareil ont été comparées avec celles des indicateurs basées sur la teneur en azote d'organes de la vigne. Sur une vigne modérément alimentée en azote, un apport d'azote de 45 U/ha a été réalisé à la floraison (van Leeuwen et al., 2000). Le N-tester a permis de différencier les deux modalités, tout comme l'analyse pétiolaire et le dosage de l'azote total, de l'azote assimilable et l'azote minéral du moût (tableau 3). Contrairement aux dosages des différentes formes d'azote du moût, du pétiole et du limbe, cet appareil permet d'effectuer un diagnostic précoce et les résultats sont immédiatement connus après la mesure. En outre, les mesures sont non destructives et ne nécessitent pas d'analyses au laboratoire. Le N-tester est commercialisé par la société Yara. Un inconvénient du N-tester est que son utilisation est seulement possible en mode piéton, il ne peut pas être embarqué sur des engins agricoles. Cela limite son utilisation pour des travaux de spatialisation du statut azoté de la vigne.

Si le N-tester est assez performant pour différencier le statut azoté entre parcelles d'un même cépage, au même moment, il est difficile d'établir avec précision des normes d'interprétation. En effet, les valeurs de N-tester mesurées évoluent au cours de la saison et peuvent varier en fonction du cépage (les valeurs sont sans unité). Par ailleurs, tout trouble physiologique ou maladie qui peut affecter la coloration

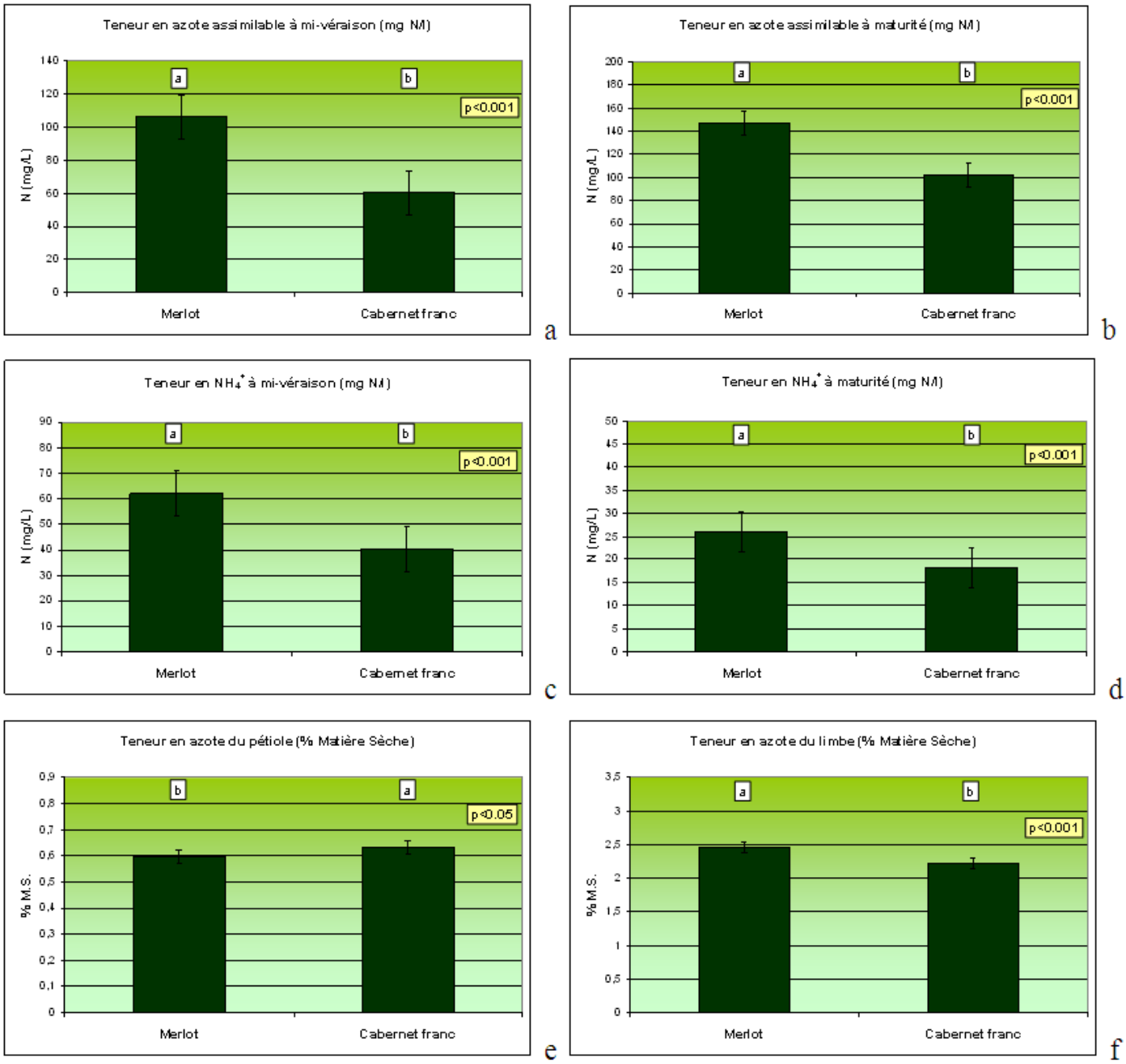

Figure4 –Teneur en azote assimilable du moût à mi-véraison (a), à maturité (b), de NH4+ du moût à mi-véraison (c) et à maturité (d) de l'azote total du pétiole à mi-véraison (e) et l'azote total du limbe à mi-véraison (f) des cépages Merlot et Cabernet franc de la région de Saint-Émilion (moyennes 2004-2011 sur trois sols). Une valeur qui porte une lettre différente (a, b ou c) est statistiquement différente (ANOVA suivi de test de Newman et Keuls).

	N- TESTER		TENEUR EN AZOTE DU MOÛT			ANALYSE PÉTIOLAIRE (VÉRAISON)
	30/07	17/09	Ntotal (mg N/l)	Nassimilable (mg N/l)	N NH_4^+ (mg NH_3 /l)	N total %
0 kg N/ha						
moyenne (n=5)	**50.3**	**494**	**436**	**194**	**33**	**0.52**
écart type	**32.7**	**39.2**	**18.09**	**9.13**	**4.18**	**0.08**
45 kg N/ha						
moyenne (n=5)	**577**	**577**	**527**	**230**	**47**	**0.66**
écart type	23.7	31.0	20.95	9.83	2.77	0.08
Test de student : différence significative à	**0,01**	**0,01**	**0.0001**	**0.001**	**0.001**	**0.05**

Tableau 3. Comparaison du N-tester avec quatre autres indicateurs de l'alimentation en azote de la vigne pour leur capacité à distinguer deux niveaux de fertilisation minérale (0 et 45 kg N/ha). Cépage Merlot, 1999, Saint-Emilion

de la feuille (chlorose, maladie à virus….) modifie la valeur de l'indice N-tester indépendamment du statut azoté de la vigne. Il est cependant possible de donner quelques ordres de grandeur. Pour une mesure effectuée au moment de la véraison, une valeur N-tester inférieure à 400 indique une très faible alimentation en azote de la vigne, une valeur comprise entre 400 et 450 indique une faible alimentation en azote, une valeur comprise entre 450 et 500 une alimentation en azote moyenne, une valeur comprise entre 500 et 550 une alimentation en azote forte et une valeur supérieure à 550 une alimentation en azote très forte.

ÉVALUATION DES CONDITIONS D'ALIMENTATION EN AZOTE DE LA VIGNE PAR D'AUTRES APPAREILS DE MESURE OPTIQUE

Le greenseeker (société Avidor) est un appareil de proxy détection qui permet d'établir un indice de végétation, le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Il s'agit d'un outil qui peut être embarqué sur des engins agricoles et qui mesure à la fois de la porosité de la canopée et sa teneur relative en chlorophylle (Goutouly et al., 2006). Cette dernière est susceptible de varier principalement avec le statut azoté de la vigne. En revanche, d'autres facteurs peuvent agir sur la porosité de la canopée (contrainte hydrique par exemple), indépendamment du statut azoté de la vigne.

Le multiplex (société ForceA) est un capteur de proxy détection qui est prometteur pour le diagnostic du statut azoté de la vigne (Cerovic et al., 2008). L'un des indices qu'il permet de générer, le SFR_G, est directement relié à la teneur en chlorophylle et présente, par conséquent, de très bonnes corrélations avec d'autres indicateurs du statut azoté de la vigne, comme par exemple l'azote assimilable du moût (Serrano et al., 2010). Le multiplex génère également un indice, appelé Nitrogen Balance Index, qui est le rapport entre l'indice SFR_G et l'indice FLAV (lié à la teneur en Flavonols). Il faut signaler que le coût du multiplex est nettement plus élevé que celui du greenseeker.

EFFET MILLÉSIME SUR LA NUTRITION AZOTÉE DE LA VIGNE

La nutrition azotée varie en fonction du sol. Elle varie également en fonction du millésime, car les conditions climatiques au printemps influent sur la vitesse de minéralisation de la matière organique. Dans la région de Saint-Émilion, 2008 et 2011 ont été des années où l'alimentation en azote a été relativement faible (figure 5). Il est probable que le niveau de nutrition azoté influe sur les caractéristiques du millésime. 2008 est un bon millésime dans la région de Bordeaux pour les vins rouges, malgré l'absence de contraintes hydriques. Il est possible que la faible alimentation en azote, induite par des conditions climatiques particulières au printemps (très fortes précipitations au mois de mai) ait pu contribuer à modérer la vigueur et à créer des conditions favorables à l'accumulation des composés phénoliques dans les raisins. Il s'agit cependant seulement d'hypothèses qui méritent d'être explorées plus en profondeur. L'effet du sol est néanmoins plus important que l'effet millésime sur le statut azoté de la vigne : dans cette étude, 45% de la variance totale de la teneur en azote assimilable du moût avait été déterminée par l'effet « sol », 14% par l'effet « millésime » et 17% par l'effet « cépage ».

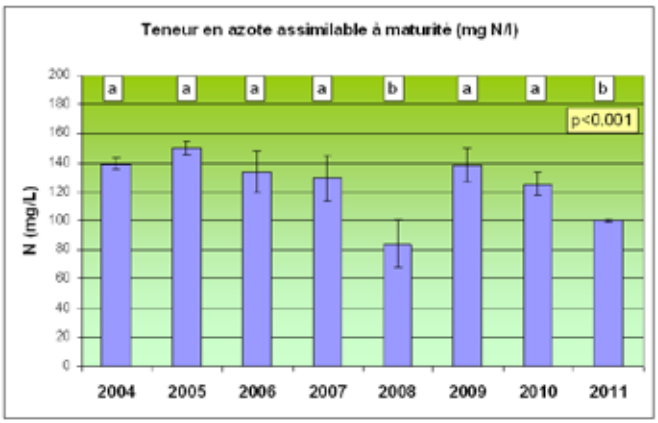

Figure 5 – Effet millésime sur la teneur en azote assimilable du moût (moyennes de deux cépages et trois sols). Une valeur qui porte une lettre différente (a ou b) est statistiquement différente (ANOVA suivi de test de Newman et Keuls).

LA SPATIALISATION DU STATUT AZOTÉ DE LA VIGNE

Au même titre que le régime hydrique de la vigne, son statut azoté a un effet important sur la vigueur, le niveau de production et la composition du raisin. Le statut azoté de la vigne varie fortement en fonction de paramètres liés au sol (teneur en matière organique, rapport C/N de la matière organique, vitesse de minéralisation de la matière organique) et peut, à ce titre, être considéré comme un élément du terroir. Cette variabilité s'opère sur de courtes distances, à l'échelle parcellaire voire même à l'échelle intra-parcellaire. Pour une meilleure connaissance du terroir il est fondamental d'appréhender cette variabilité. Il est également important de gérer cette variabilité intra-parcelle, par une adaptation de la gestion technique (modulation de la fertilisation ou de l'entretien du sol). Parmi les indicateurs qui permettent d'évaluer le statut azoté de la vigne, la teneur en azote assimilable du moût est robuste et facile à mesurer. Il est possible d'effectuer un nombre suffisant de mesures d'azote assimilable sur une parcelle ou une propriété pour spatialiser le statut azoté de la vigne par le biais de cet indicateur. Sur la figure 6, le statut azoté de la vigne a été spatialisé sur un domaine de 37 ha par la mesure de la teneur en azote assimilable

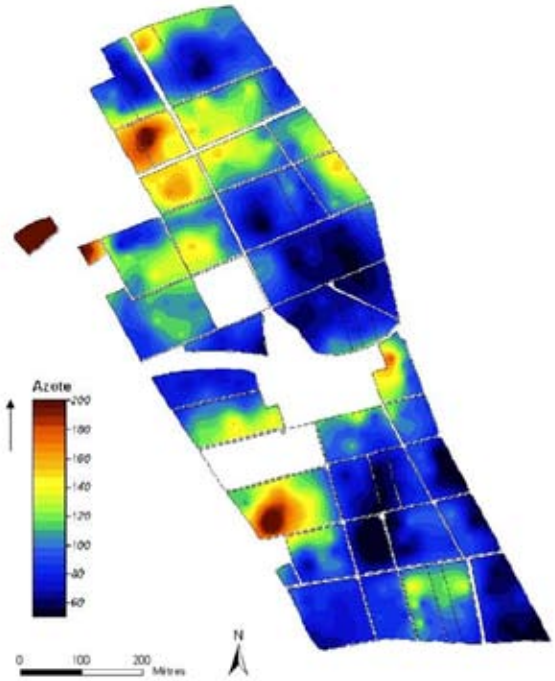

Figure 6. Variabilité spatiale du statut azoté de la vigne sur un domaine viticole de 37 hectares, situé à Saint-Émilion, en 2009, évaluée par la teneur en azote assimilable du moût à maturité (mg N/L).
Densité de mesures : 10/ha, soit environ 350 mesures pour la réalisation de la carte.

du raisin à maturité sur dix placettes par hectare (collaboration David Pernet, SOVIVINS). Sur cet exemple, la teneur en azote assimilable du moût à maturité varie du simple au quadruple. Certaines parcelles sont entièrement soumises au même type d'alimentation en azote (forte ou faible) tandis que sur d'autres parcelles l'alimentation en azote peut être fortement variable à l'intérieur même de la parcelle. Un lien peut être établi avec les types de sol présents sur la propriété. L'alimentation en azote y est forte sur les sols graveleux et faible sur les sols argileux. La limite de cette approche réside dans le fait que la teneur en azote assimilable du moût est également influencée par le cépage. La propriété de la figure 6 est plantée avec du Merlot et du Cabernet franc. À nutrition azotée égale, les raisins de Cabernet franc sont plus pauvres en azote assimilable que les raisins de Merlot.

Conclusion

De nombreux indicateurs existent pour évaluer le statut azote de la vigne. Trois approches existent : l'analyse de sol, l'analyse d'organes de la vigne ou l'utilisation de capteurs optiques. L'analyse de sol est d'un intérêt limité car il est difficile d'extrapoler la nutrition azotée de la vigne à partir de valeurs d'azote total. La teneur en azote peut être analysée dans de nombreux organes, comme le pétiole, le limbe ou le raisin, sous différentes formes (NH4+, azote assimilable par les levures, azote total) et à différents moments de la saison. La plupart de ces indicateurs varient avec le statut azoté de la vigne. L'azote assimilable du moût est facile à doser et constitue à ce titre un indicateur de choix. Cependant, il varie avec le cépage et le rendement ce qui rend l'établissement de normes précis d'interprétation délicat. Il est plus facile d'établir de telles normes pour l'azote total du pétiole et du limbe, qui varient moins fortement avec le cépage. La mesure d'indices par des appareils optiques, tels que le N-tester, le greenseeker ou le Multiplex est facile et présente l'intérêt de donner des valeurs à l'instant de la mesure. Il est probable que ces appareils prendront de plus en plus d'importance dans l'évaluation du statut azoté de la vigne. Etant donné l'importance d'une connaissance précise du statut azoté de la vigne pour caractériser le terroir et conduire le vignoble, il est recommandé de croiser plusieurs indicateurs (par exemple azote assimilable du moût à maturité, teneur en azote du limbe à mi-véraison et mesure de l'indice N-tester à mi-véraison). La spatialisation du statut azoté, à l'échelle parcellaire ou intra-parcellaire, est particulièrement intéressante. Elle peut être obtenue à l'aide de mesures de l'azote assimilable du moût ou des mesures avec des capteurs optiques embarqués.

Remerciements

Les auteurs remercient Jean-Pascal Goutouly (INRA-UMR EGFV Bordeaux) pour une relecture critique du manuscrit et Laure de Rességuier (ENITA – UMR EGFV Bordeaux) pour la mise en forme de la figure 6.

Références bibliographiques

BOURGUIGNON C., 1995. Le sol, la terre et les champs, Ed. Sang de la Terre, 221 pp.

CHONE X., VAN LEEUWEN C., CHERY Ph. and RIBEREAU-GAYON P., 2001. 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.

CEROVIC Z., MOISE N., AGATI G., LATOUCHE G., BEN GHOZLEN N. and MEYER S., 2008. New portable optical sensors for the assessment of winegrpae phenolic maturity based on berry fluorescence. J. Food Comp. Anal., 21, 650-654.

GOUTOULY J.-P., DRISSI R., FORGET D. and GAUDILLÈRE J.-P., 2006. Characterization of vine vigour by ground based NDVI measurements. 6th International Terroir Congress Bordeaux-Montpellier, 237-242.

DELAS J., 2010. Fertilisation de la vigne, 2e edition. Ed Féret, Bordeaux, 165p.

MASNEUF I. et DUBOURDIEU D., 1999. L'azote assimilable: intérêt de son dosage par formol titration; étude de quelques paramètres à l'origine des variations de sa teneur dans les moûts. Rev Œnol., n°93, 31-32.

SERRANO E., DIAS F., BIAIS T. et DUFOURCQ T., 2010. Les nouvelles technologies pour renseigner du statut azoté des raisins. Recherche de modèles de prédiction à l'aide du capteur multiplex. Colloque Mondiaviti, Bordeaux, 101-109.

SOYER J.-P., MOLOT C., BERTRAND A., GAZEAU O., LOVELLE B. et DELAS, J., 1995. Influence de l'enherbement sur l'alimentation azotée de la vigne et sur la composition des moûts et des vins. Œnologie 95, 5e Symposium International Œnologie, Bordeaux, Ed. Lavoisier Tech et Doc, 81-84.

SPRING J.-L., 1999. Indice chlorophyllien du feuillage et nutrition azotée du cépage Chasselas. Rev. Suisse Vitic. Arboric. Hortic., 31, 141-145.

TREGOAT O., VAN LEEUWEN C., CHONE X. et GAUDILLERE J.-P., 2002. Etude 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). J. Int. Sci. Vigne Vin. 36, n°3, 133-142.

VAN LEEUWEN C., FRIANT Ph., SOYER J.-P., MOLOT C., CHONE 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.

SPÉCIALITÉS BIOLOGIQUES, SOUFRE ÉLÉMENTAIRE OU SULFATE :

DERNIÈRES ACTUALITÉS SUR LES PULVÉRISATIONS AZOTÉES FOLIAIRES

THIERRY DUFOURCQ[1], OLIVIER GEFFROY[2], SANDRINE NARDI[1], DORIAN CARCENAC[2]

Institut Français de la Vigne et du Vin - Pôle Sud-Ouest,
[1] Château de Mons, 32100 Caussens, thierry.dufourcq@vignevin.com
[2] V'innopôle, BP 22, 81 310 Lisle sur Tarn

RAPPEL DES EFFETS DE LA FERTILISATION FOLIAIRE D'AZOTE ET D'AZOTE-SOUFRE

L'azote pulvérisé sur vigne sous forme d'urée à véraison entraine, la plupart du temps, une augmentation de la concentration en azote du moût (figure 1). Pour 10 kg d'azote pulvérisés par hectare, on peut attendre une augmentation de 50% de la concentration en azote du moût, pour 20 kg par hectare on double cette concentration. Cependant, de nombreux facteurs peuvent influencer l'efficience de la pulvérisation azotée : le système de production, la période et les pratiques de pulvérisation, les conditions climatiques, la formulation du produit. Il s'agit d'être particulièrement attentif à la mise en œuvre cette technique (IFV Sud ouest, 2011).

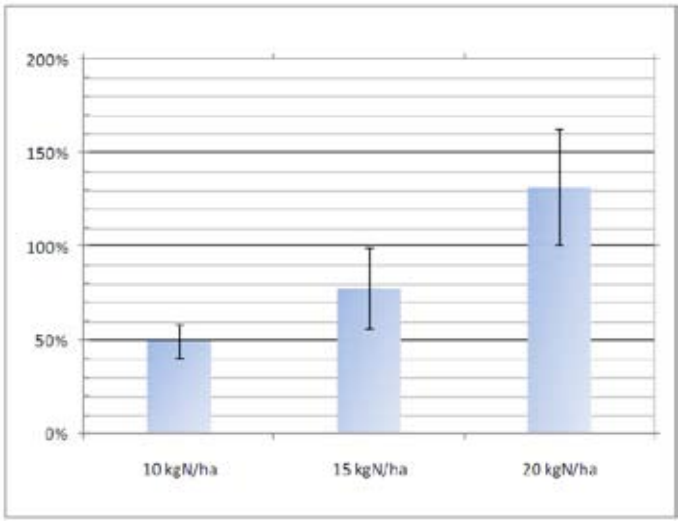

Figure1 : gain en azote assimilable des moûts après pulvérisation d'azote foliaire à véraison. Synthèse de résultat pour 101 échantillons. Barres d'erreur = intervalle de confiance à 95%.

Au niveau des effets sur la composition aromatique des vins, nous avons étudiés les effets de la technique sur la présence des thiols variétaux dans les vins ainsi que des composés fermentaires (acétates d'alcools supérieurs et esters éthyliques).

Nous avons mis en évidence que les vins issus des parcelles traitées par pulvérisation foliaire d'azote sont plus riches en acétates d'alcools supérieurs. En revanche, les teneurs en esters éthyliques d'acides gras ne sont pas significativement affectées par les apports d'azotes testés. Pour ce qui concerne les thiols variétaux dans les vins, Il y a toujours eu un gain dans les vins issus des parcelles traitées par pulvérisation d'azote-soufre en comparaison aux témoins (figure 2). En moyenne, on observe quatre fois plus de composés aromatiques dans les vins. Même lorsque le témoin présente un haut niveau en thiols (10 à 50 nanomoles par litre), nous avons obtenu des améliorations importantes dans les vins issus des blocs traités (trois fois plus de 3MH et d'A3MH). Cela suggère que cette technique influence de manière importante la production de ce type de composés en vinification. Lorsqu'un niveau plus faible de thiols est présent dans les vins témoins (0,4 à 6 nanomoles par litre) le gain moyen est de cinq fois plus que le témoin (figure 2). Les dégustations mettent en avant des différences, la plupart du temps significatives, entre les vins issus des blocs pulvérisés et témoins non traités. Cela permet de confirmer les effets positifs de la technique. Elles confirment également qu'il n'y a pas d'apparition d'odeurs soufrées indésirables dans les vins aux doses préconisées.

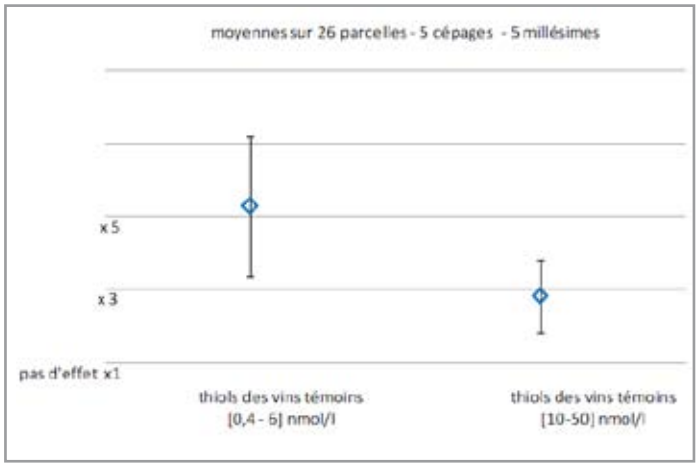

Figure 2 : gain en thiols variétaux (3MH + Ac3MH) dans les vins par rapport à un témoin après pulvérisation foliaire d'azote-soufre sur vigne. Synthèse de résultats : 26 parcelles issues de 5 cépages au cours de 5 millésimes. Barres d'erreur = intervalle de confiance à 95%.

EFFET DE LA FERTILISATION FOLIAIRE D'AZOTE-SOUFRE SUR LES THIOLS VARIÉTAUX DANS LES VINS : UTILISATION DES FORMES CHIMIQUES DE SOUFRE

Nous avons privilégié l'utilisation de soufre élémentaire (S2) comme fertilisant foliaire en association avec l'azote. Nous avons pris comme base des travaux de recherche sur céréales (Téa, 2004) qui montrent l'enrichissement en peptides soufrés du grain de blé après traitement foliaire. Cependant, la principale forme de soufre utilisée en fertilisation au champ est le sulfate (SO4), généralement du sulfate d'ammoniaque ou de potasse. C'est la forme ionique la plus assimilable par les plantes. Nous avons donc cherché à comparer l'efficacité des associations urée-soufre en fonction de la forme chimique de cet élément. Sachant que l'utilisation de l'azote seul en foliaire permet également un gain en thiols variétaux dans les vins, la comparaison a porté sur 4 variantes : un témoin non traité, une pulvérisation d'urée, une pulvérisation d'urée associée à un sulfate, une pulvérisation d'urée associée à un soufre élémentaire. Cet essai a été répété sur trois millésimes. Les doses apportées sont équivalentes au sein de chaque année d'essai.

Les résultats obtenus avec l'association urée+sulfate ne se distinguent pas de ceux obtenus avec la pulvérisation d'urée seule. En revanche l'association urée+soufre élémentaire montre des gains en thiols variétaux dans les vins bien supérieurs (figure 3). A la dégustation des vins, les plus fortes différences sont perçues avec les vins issus des

fertilisations urée+soufre élémentaire. Dans tous les cas, l'association urée+sulfate n'est jamais distinguée de la fertilisation uréique seule. Ainsi, lorsque l'objectif de positionner une fertilisation foliaire est de rechercher une surexpression des thiols variétaux dans les vins, nous recommandons l'utilisation de l'association urée-soufre élémentaire pour une efficacité optimisée.

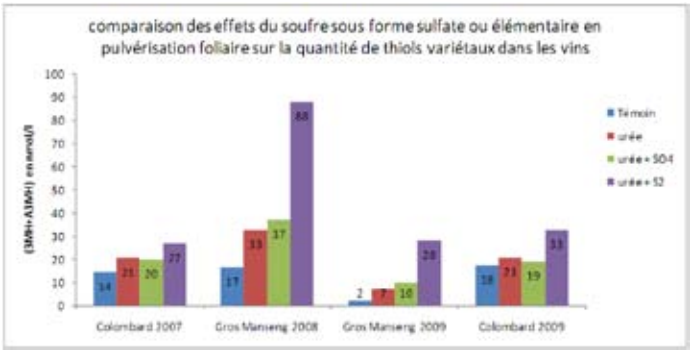

Figure 3 : comparaison des effets du soufre sous forme sulfate ou élémentaire utilisé en pulvérisation foliaire en association avec de l'azote sur la quantité de thiols variétaux (3MH+ A3MH) obtenue dans les vins ; millésimes 2007-2008-2009 ; cépages Colombard et Gros Manseng.

Fertilisation foliaire d'azote : effet sur la composition azotée du moût

Nous avons comparé la composition des mouts en azote assimilable par les levures issus de parcelles fertilisées en azote foliaire et non fertilisées. Cet azote est composé d'une fraction ammoniacale (NH4) et d'une fraction organique composée d'acides aminés libres. La comparaison a porté sur la proportion d'azote ammoniacal dans la fraction d'azote assimilable retrouvée dans les mouts de raisins.

La pulvérisation foliaire d'urée sur vigne à véraison permet un enrichissement en azote des mouts à la récolte. L'azote du moût est le nutriment indispensable à la multiplication cellulaire des levures en fermentation. De plus, la levure est un élément clé pour la production de composés aromatiques dans les vins. Les souches de levures œnologiques ont aussi des sources préférentielles pour la consommation de l'azote et leur fonctionnement peut être variable en fonction de la composition du milieu (Julien et al., 2010). Ainsi, la présence en excès d'ion ammonium dans le mout peut activer une répression de l'assimilation des acides aminés par la levure (Henschke et Jiranek, 1992) mais également le transport de précurseurs de thiols variétaux (dérivés de cystéine ou de glutathion) et par conséquent limiter leur conversion en arome libre dans le vin (Subileau, 2008).

15 parcelles ont servi à comparer la fertilisation foliaire 10kgN/ha et 12 parcelles à comparer les effets de la fertilisation foliaire 20kgN/ha ainsi que 6 cépages rouges de Midi-Pyrénées (Malbec, Négrette, Duras, Fer, Cabernet Sauvignon, Merlot) et 4 cépages blancs (Colombard, Gros Manseng, Loin de l'œil, Sauvignon) au cours de 4 millésimes (2007-2010). Les concentrations en azote des témoins non traités se répartissent de 84mg/l à 313mg/l. Les proportions d'ion ammonium dans l'azote assimilable des moûts sont extrêmement variables, de 11% à 50%. Nous n'avons pas observé de différences significatives (figure 4) dans les proportions d'azotes (ratio azote ammoniacal/azote assimilable) entre une parcelle fertilisée en azote foliaire et son témoin non traité. A 10kgN/ha, la proportion d'azote ammoniacal est légèrement supérieure au témoin, en moyenne 5%, à 20kg/ha elle est légèrement inférieure d'environ 8%.

Nous pouvons conclure que, dans nos conditions, la pulvérisation foliaire d'urée à véraison n'a pas modifié le ratio azote ammoniacal sur azote assimilable des raisins à la récolte.

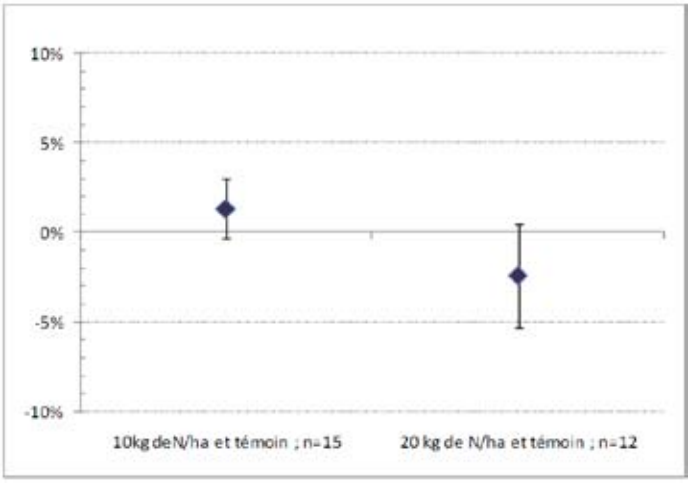

Figure 4 : Comparaison des ratios azote ammoniacal/assimilable sur parcelles fertilisées en foliaire (10kgN/hectare, 20kgN/hectare) et témoin non traité. Synthèse de résultats : 27 parcelles fertilisées. Barres d'erreur = intervalle de confiance à 95%.

Fertilisation foliaire d'azote avec des spécialités utilisables en agriculture biologique

En 2010 nous avons testé 3 spécialités à base d'azote organique sur une parcelle de Sauvignon menée en agriculture biologique (AOP St Sardos - 82). La concentration en bouillie a été calculée pour apporter un équivalent de 10 kg d'azote par hectare. Le mout témoin présentait une concentration en azote assimilable de 116mg/l. Parmi les 3 produits, la spécialité aminovital (Biofa) avait donné les résultats les plus intéressants (figure 5).

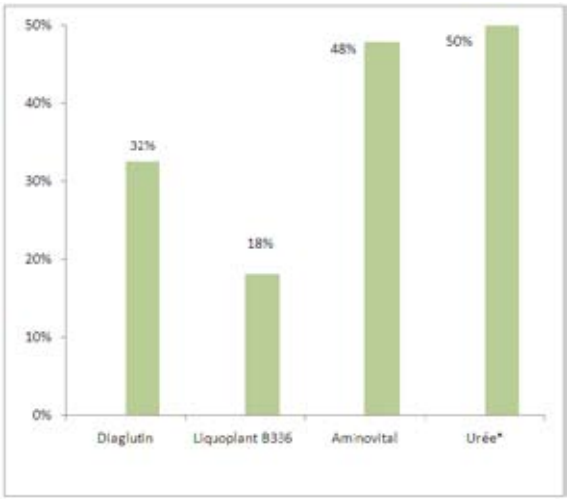

Figure 5 : Gain en azote des raisins après fertilisation azotée à 10 kg/ha par rapport à un témoin non traité ;
** valeur moyenne théorique calculée sur la base d'un gain de 50%*

L'impact sensoriel des pulvérisations foliaires a été mesuré par analyse de la composition des vins embouteillés en thiols variétaux et par dégustation.

Les dosages de thiols variétaux ont été réalisés le 16 mars 2011 par le LAAE de l'Université de Saragosse (Espagne). Des travaux ont montré que la teneur des raisins et des moûts en cuivre avait un impact important sur la teneur des vins en thiols variétaux, cet élément jouant un rôle catalyseur majeur dans les réactions d'oxydation de ces arômes. Etant utilisé en viticulture biologique dans la lutte contre le mildiou, plus ou moins tardivement et à des doses variables, il nous a apparu important de contrôler la teneur en cuivre des raisins à la récolte. Ce contrôle a été réalisé par l'Oenolabo du Gers (Eauze, 32).

La quantité de thiols variétaux (3MH + A3MH) dosée dans les vins de Sauvignon est faible pour ce cépage. Le résultat des analyses d'aromes (tableau 1) met en évidence, pour les trois modalités traitées, une diminution par rapport au témoin de la teneur des vins en thiols variétaux. C'est la première fois que nous constatons au cours de nos essais une baisse du potentiel aromatique suite à une pulvérisation foliaire azotée suivie d'un gain en azote du mout. Les trois spécialités appliquées à la véraison et à des doses conventionnelles (5 à 20 kg de N /ha) ont pénalisé le potentiel aromatique des vins d'un faible niveau initial.

MODALITÉ	3MH [NG/L]	AC3MH [NG/L]	CU^{2+} [MG/L]
Témoin	439	44	0.6
Liquoplant B336	128	11	
Diaglutin	174	37	
Aminovital	128	15	

Tableau 1 : concentrations en thiols variétaux dans les vins ; concentration en cuivre sur les raisins à la récolte ; cépage Sauvignon, millésime 2010.

La dégustation des vins d'essai a été réalisée le 16 juin 2011 par un jury de dégustateurs gersois. Les différences organoleptiques entre les vins sont peu marquées. Le potentiel aromatique du vin témoin se distingue par une intensité au nez et une intensité « thiols » légèrement supérieures (figure 6). Ces résultats vont dans le même sens que les résultats des analyses de composés aromatiques. Les résultats encourageant sur vigne ne se sont pas confirmés dans les vins.

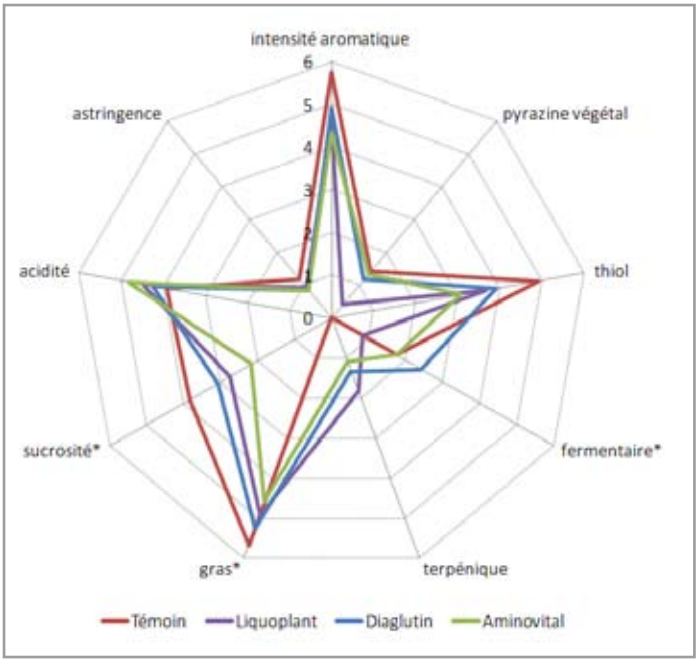

Figure 6 : Résultat de la dégustation - Moyenne des notes sur 10 - Analyse de variance *: significativité au seuil de 5%, test de comparaison des moyennes de Newman&Keuls Thiols = buis, pipi de chat, pamplemousse, citron, mangue, fruit de la passion Fermentaire = poire, banane, pomme verte, fraise.

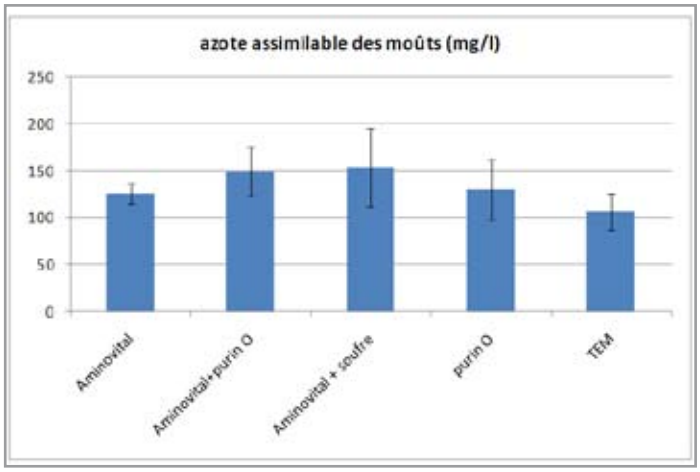

Figure 7 : concentration en azote des moûts après pulvérisation foliaire d'Aminovital (Biofa) (équivalent 10kg de N/ha) seul ou en association avec du purin d'ortie (160L/ha) ou du soufre (S élémentaire 5kg de S/ha) ; cépage Colombard ; millésime 2011.

En 2011, nous avons continué à tester des associations à base d'azote organique seul ou en association. La spécialité aminovital (Biofa) (10kgN/ha) a été associée et comparée à du purin d'ortie (160L/ha). Les résultats ne mettent en évidence aucune différence significative à 5% (figure 7). Malgré des écarts moyens intéressants entre le témoin et l'association Aminovital-purin d'ortie, la variabilité intra parcellaire est trop importante pour pouvoir conclure d'un quelconque effet positif du traitement foliaire.

Bibliographie

DUFOURCQ T., CHARRIER F., POUPAULT P., SCHNEIDER R., GONTIER L., SERRANO E, 2009. Foliar spraying of nitrogen and sulfur at veraison: a viticultural technique to improve aromatic composition of white and rosés wines. 16th International GiESCO Symposium, Davis (USA) p379-383

HENSCHKE P.A., JIRANEK V., 1992. Yeast – Metabolism of nitrogen compounds. In: Fleet GH. Wine, Microbiology and Biotechnology. Harwood Academic Publishers, Sydney, 77 – 164.

JULIEN A., ROUSTAN J.L., DULAU L., SABLAYROLLES J.M., 2001. Variabilité des besoins en oxygène et en azote assimilable suivant les souches de levures oenologiques. Revue Française d'oenologie no189, pp. 20-22.

SUBILEAU M., 2008. Parameters influencing varietal thiol release by strains of Saccharomyces cerevisiae: from a controlled synthetic medium to the complexity of Sauvignon blanc must. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, 154.

IFV SUD-OUEST, 2011. http://www.vignevin-sudouest.com/publications/fiches-pratiques/pulverisation-azote-foliaire.php. Consulté en novembre 2011.

OPTIMISATION DE L'UTILISATION DE LA BENTONITE :

INTÉRÊT DES COLLAGES SUR MOÛT POUR PRÉSERVER L'AROMATIQUE DES VINS

François-Xavier Sauvage

[1] INRA, UMR 1083 Sciences Pour l'Œnologie, 2 place Viala, 34060 Montpellier
[2] SupAgro, UMR 1083 Sciences Pour l'Œnologie, 2 place Viala, 34060 Montpellier
[3] UMI, UMR 1083 Sciences Pour l'Œnologie, 2 place Viala, 34060 Montpellier
sauvage@supagro.inra.fr

RÉSUMÉ

Le traitement de collage à la bentonite est une étape que le vinificateur réalise sur ses vins pour éliminer les protéines et les risques d'instabilité colloïdale qui leur sont associés. Cette argile a la propriété d'adsorber les protéines au pH du vin. Lors de son emploi avant la mise en bouteille, il est reconnu une perte de la couleur et des arômes du vin. Ceci est d'autant plus marqué que les doses de bentonite utilisées sont élevées et les vinificateurs ont constaté, ces dernières années, une augmentation très importante des doses à mettre en œuvre pour stabiliser les vins. L'objectif de notre étude a été d'évaluer l'impact des ajouts de bentonite au cours de la fermentation alcoolique sur la stabilité et les caractéristiques organoleptiques des vins, ceci en tenant compte des doses de bentonite utilisées mais aussi du moment de l'ajout de la bentonite. Bien entendu, le suivi des cinétiques de fermentation des moûts ainsi que la disparition des protéines ont été observés. Le but est dans un premier temps de proposer (1) à la profession un nouveau protocole d'utilisation de la bentonite pour stabiliser les vins mais aussi (2) une diminution des doses et par conséquent (3) une réduction des effets indésirables sur la qualité du produit fini.

INTRODUCTION

Les protéines du vin blanc ont longtemps été considérées comme un mélange de protéines provenant du raisin, mais aussi des levures [1 et 2] et des bactéries employées durant la vinification. Plus récemment, Ferreira et al. [3] ont montré, grâce aux nouvelles techniques immunologiques, que les protéines du vin blanc auraient une origine végétale et que la grande majorité proviendrait de la pulpe du raisin. Grâce aux évolutions de la spectrométrie de masse, la quasi-totalité des protéines contenues dans les vins blancs, identifiées à ce jour, sont des protéines issues du raisin et la majorité d'entre elles appartiennent à une seule catégorie : les Pathogenesis Related Protein (PRP) ou protéines de défense [4 et 5]. Ces PR protéines ne sont pas dégradées pendant la vinification et sont responsables de la casse protéique des vins après la mise en bouteilles [6]. Les vins blancs en contiennent des concentrations allant de 15 à 300 mg/L [7].

Cette instabilité protéique des vins se manifeste par un trouble blanchâtre. Ce trouble déprécie la qualité aux yeux du consommateur et occasionne donc une perte économique importante pour le viticulteur. Elle concerne majoritairement les vins blancs mais aussi certains rosés. Elle est attribuée à une dénaturation lente des protéines et peut être accélérée par d'autres composés du vin. Ainsi en présence de tannins, il peut se former un complexe tannins-protéines. Ce trouble peut aussi provenir de l'augmentation de la température du vin lors du transport ou du stockage : les protéines les plus sensibles à la chaleur vont s'agréger et précipiter. Si la quantité globale de protéines joue un rôle important dans l'instabilité des produits, cette instabilité est également très dépendante de la composition (répartition entre les différentes classes de protéines) [8].

Pour la prévenir, les protéines sont éliminées avant la mise en bouteille. La méthode la plus utilisée, car la plus simple et la moins coûteuse, est le traitement à la bentonite également appelé « collage ». Cette argile, chargée négativement, est capable d'adsorber les protéines qui sont elles chargées positivement au pH du vin. Bien qu'efficace, ce collage à la bentonite présente de nombreux inconvénients. Il a pour conséquence une diminution de la couleur et du potentiel aromatique, lié à l'adsorption de matière colorante et d'arômes [9 et 10]. Il induit également des pertes non négligeables de vin, de l'ordre de 5 à 10% en volume [11].

Pour remédier à ces différents inconvénients, les effets de l'ajout de bentonite à différents stades de la fermentation alcoolique ont été étudiés. En particulier, de façon à optimiser ce traitement, nous avons cherché à évaluer l'impact de la dose de bentonite et du moment de l'ajout sur la stabilité et la qualité gustative des vins obtenus.

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Notre étude a porté sur 3 moûts issus de cépages différents : un Chardonnay, un Sauvignon et un Vermentino. 13 mini-vinifications ont été réalisées sur chaque cépage : une mini-vinification témoin, sans ajout de bentonite et 12 mini-vinifications avec ajout de 40, 80 et 150 g.Hl-1 de bentonite au début de la fermentation alcoolique (FA), à ¼ de la FA, à ½ de la FA et à la fin de la FA. L'évolution de la fermentation alcoolique a été suivie par la mesure journalière de la densité. Durant cette fermentation, des prélèvements ont été réalisés tous les 2 jours afin d'analyser l'évolution du contenu en protéines des moûts. Les vins ont ensuite été soutirés (2 à 3 jours après la fermentation), ajustés en SO2, filtrés et mis en bouteilles avant l'évaluation de leurs caractéristiques sensorielles. L'instabilité des vins a été déterminée par un test à la chaleur (80 °C, 30 min) suivi d'une mesure de la turbidité.

Pour le suivi du contenu protéique, 500µl de chaque échantillon ont été concentrés 5 fois par ultrafiltration, réalisée au moyen de centricons (seuil de coupure 3kDa, Millipore). La centrifugation a été réalisée à 8000 g pendant 30 min. Le concentrat, contenant toutes les molécules dont la masse moléculaire est supérieure à 3kDa, a alors été mélangé avec le tampon Laemmli 4X (3 : 1 v/v) afin de dénaturer et de solubiliser les protéines avant la séparation électrophorétique 1D SDS PAGE. Cette séparation a été effectuée sur des gels d'acrylamide à 14%, sur lesquels a été déposé l'équivalent de 400 µl de chaque moût. La migration des protéines dans le gel a été effectuée sous un courant de 20mA par gel, à température ambiante. L'électrophorèse terminée, le gel a été coloré au bleu de Coomassie pendant 2 h puis décoloré à l'acide acétique 10% jusqu'à l'obtention d'un fond de gel incolore. Les gels décolorés ont été numérisés à 300 dpi grâce à un scanner à transmission avant d'être quantifiés par un logiciel d'analyses d'images (TotaLabTL120) en nuances de gris. Toutes les bandes de chaque puits ont été repérées en fonction de leur distance de migration, par référence à une gamme étalon composée de 6 protéines de quantité et de masse moléculaire connues. Il a ainsi été possible de suivre l'évolution de la concentration de chaque classe de protéines présentes dans l'échantillon et d'en déduire le pool total de protéines.

L'analyse sensorielle a été réalisée uniquement sur les vins Chardonnay, par un jury de 17 juges sélectionnés et entraînés. Les produits ont été présentés dans des verres blancs selon un plan carré latin [12]. Les

échantillons ont été notés sur une échelle d'intensité, linéaire, continue et bornée. L'analyse sensorielle a été réalisée en deux séances, avec deux répétitions de la notation et, au préalable, trois séances de génération de vocabulaire et d'entraînement. Les logiciels FIZZ (réseau Biosystème) pour l'acquisition des données et XLstat (Addinsoft) pour le traitement statistique des résultats ont été utilisés. La différenciation et la caractérisation des échantillons ont été obtenues par des analyses de variances et des analyses multidimensionnelles : ACP (Analyse en Composantes Principales). Les juges devaient noter 11 descripteurs appartenant aux 3 caractères classiquement utilisés : visuel (intensité de couleur, nuance vert à cuivré), olfactif (soufré, alcool, fleurs blanches, pêche, levure, animal) et gustatif (acidité, sucrosité, amertume).

Résultats

Fermentation des moûts

Les fermentations alcooliques des moûts témoins se sont déroulées à une température constante de 18°C, sur un temps plus ou moins long selon les cépages. En effet, le moût de Sauvignon a mis 18 jours pour atteindre une densité de 995 alors qu'il n'a fallu que 11 et 10 jours respectivement aux moûts de Chardonnay et de Vermentino pour atteindre ce même niveau de densité. Lorsqu'on rajoute la bentonite aux moûts en même temps que les levures et que l'on compare les durées de fermentation à celle des moûts témoins, on observe généralement des durées de fermentation légèrement plus courtes. Ceci est d'autant plus significatif que les quantités de bentonite ajoutées sont élevées.

Evolution des protéines contenues dans les moûts témoins

Les quantités totales de protéines dans les moûts témoins et leur évolution ont été déterminées en considérant les 4 classes de protéines obtenues par électrophorèse (figure 1). Les bandes observées sont généralement attribuées à des Thaumatines-like proteines (19-24 kDa), des Chitinases (25-30 kDa), des b-Glucanases (40 kDa) et des Invertases (66 kDa). La quantité totale de protéines, obtenue par la moyenne de trois répétitions, est déterminée avec une incertitude relative de 6%. Les analyses réalisées au cours de la fermentation des trois moûts témoins (sans ajout de bentonite) mettent en évidence une diminution de la teneur en protéines (figure 2). Dans le cas du Vermentino, cette perte s'élève à environ 75% des protéines initialement présentes dans le moût, alors que pour le Sauvignon et le Chardonnay ces pertes sont respectivement de 35 et 45%. Ces évolutions touchent différemment les classes de protéines en fonction du cépage considéré. Les 3 vins en fin de fermentation contiennent encore des protéines (entre 5 et 35 mg.l-1) et sont considérés comme instables après filtration. En effet, par exemple, le test à la chaleur sur 13 vins Sauvignons ont montrés que le vin témoin sans ajout de bentonite est instable (NTU = 9) contrairement aux autres échantillons traités à la bentonite qui montrent une turbidité inférieure ou égale à 2.

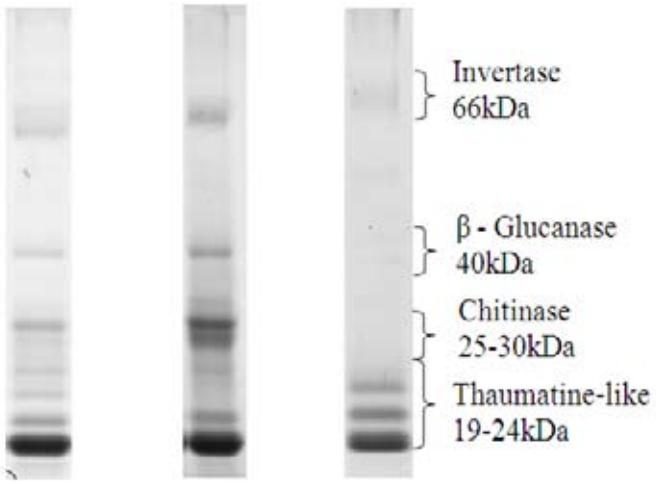

Figure 1 : Diagramme 1D PAGE des protéines contenues dans les 3 moûts témoins

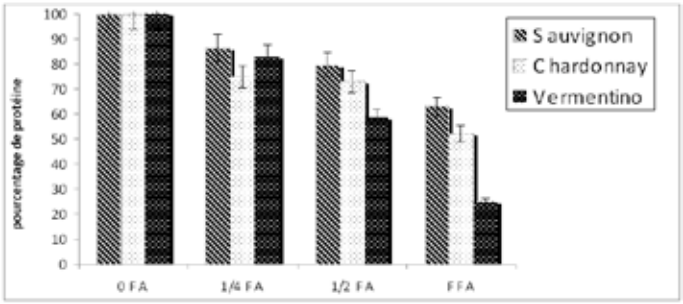

Figure 2 : Cinétique de disparition des protéines des 3 moûts témoins au cours de la fermentation alcoolique

Evolution des teneurs en protéines en cours de fermentation et en présence de bentonite

Quel que soit le cépage considéré, l'ajout de bentonite au cours de la FA se traduit par une diminution significative des teneurs en protéines par rapport aux moûts témoins. Pour le moût de cépage Vermentino, des doses de 40 g.Hl-1 entraînent la disparition quasi immédiate de l'ensemble des protéines, et ce quelque soit le moment d'introduction

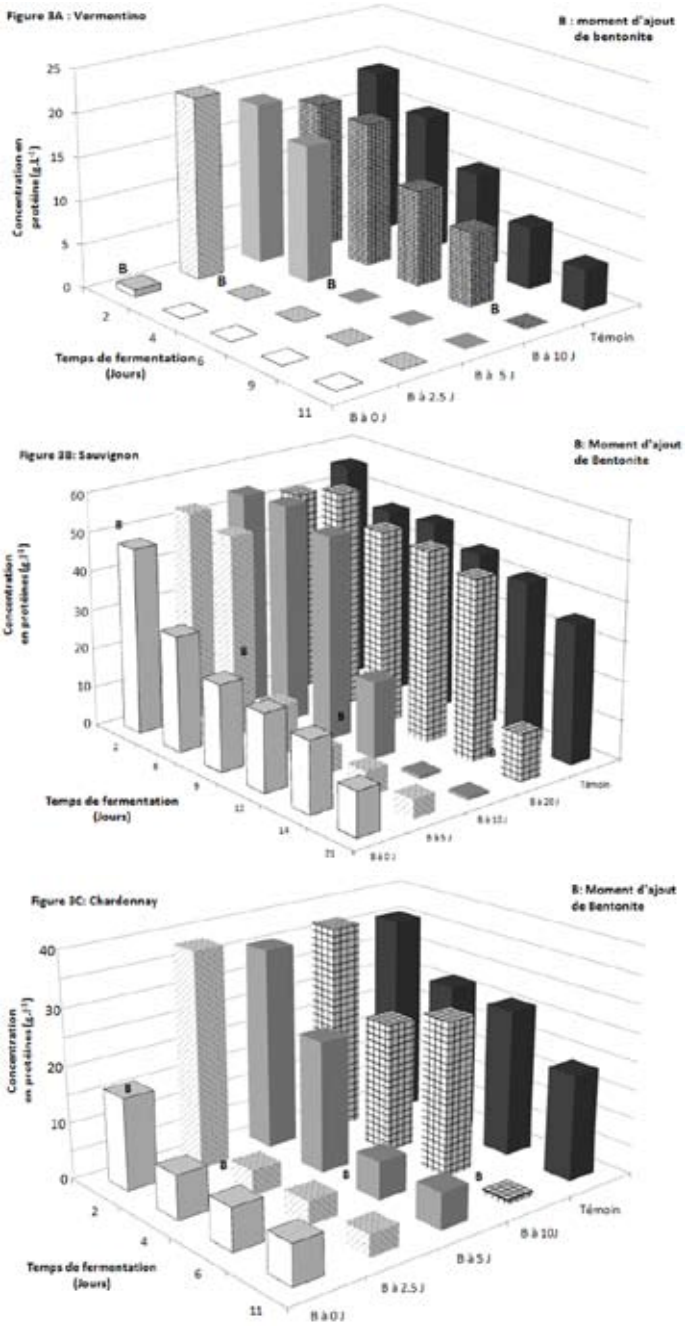

Figure 3 : Evolution des protéines au cours de la fermentation alcoolique en présence de 40 g.Hl-1 de bentonite pour le Vermentino (3A), le Sauvignon (3B) et le Chardonnay (3C).

de l'argile (figure 3A). Dans le cas des cépages Sauvignon et Chardonnay, ces doses de 40 g. Hl-1 ne sont pas suffisantes pour éliminer la totalité des protéines (figures 3B et 3C). A 40 g. Hl-1 et selon le moment de l'ajout de la bentonite, les quantités de protéines au soutirage dans ces vins varient de 2 à 12 mg l-1. Une addition à mi-fermentation dans le cas du Sauvignon semble plus favorable mais ne se vérifie pas pour le Chardonnay. Les protéines résiduelles sont dans les deux cas des invertases et des Thaumatine-like protéines. En dépit des faibles quantités résiduelles à 40 g.Hl-1, les doses nécessaires pour obtenir, au soutirage, l'élimination totale de ces protéines ont été de 80 g.Hl-1 dans le cas du Chardonnay et 150 g.Hl-1 dans le cas du Sauvignon. En accord avec des résultats antérieurs, il existe une adsorption différentielle des protéines présentes dans les moûts et les vins et certaines Thaumatines nécessitent des doses très importantes d'argiles pour pouvoir être totalement adsorbées (8). Dans l'ensemble, ces résultats montrent que les bentonites sont efficaces quelque soit le moment de leur ajout. Les quantités résiduelles de protéines sont essentiellement liées aux doses employées et à la composition initiale du moût.

Analyse sensorielle des vins de Chardonnay

Dans un premier temps l'analyse statistique des résultats a mis en évidence les performances du jury, dont la notation est répétable et consensuelle. D'un point de vue général, les différences sensorielles notées par les dégustateurs sur l'ensemble des vins issus du cépage Chardonnay et pour les différentes doses de bentonite (0, 40, 80 et 150 g.Hl-1) sont relativement faibles. Notamment, aucune perte d'intensité aromatique et de couleur n'a été mise en évidence, et ce même pour les vins traités à 150 g.Hl-1. De même, le moment de l'ajout pour une dose donnée n'induit pas de différence significative. En revanche, les analyses statistiques des notes en considérant l'effet conjoint de la concentration et du moment d'ajout indiquent des différences significatives pour 6 descripteurs sur les 11 évalués par le jury (tableau 1). Lorsque les ajouts de bentonite sont réalisés en même temps que le levurage en début de FA, une dose croissante de bentonite conduit à des vins plus cuivrés, plus pêche, moins soufré, moins animal et moins acide (figure 4). L'effet dose a tendance à s'annuler lorsque les ajouts de bentonite sont réalisés en fin de fermentation (figure 5).

Conclusion

	dose x moment
int couleur	0,0003
nuance	< 0,0001
soufré	0,010
alcool	0,624
fleurs blanches	0,309
pêche	0,019
levure	0,133
animal	0,034
acidité	< 0,0001
amertume	0,790
sucrosité	0,118

Tableau 1 : Probabilités de l'analyse de variance pour l'interaction dose x moment d'ajout.

Cette expérimentation montre en premier lieu, grâce à l'analyse sensorielle que l'ajout de bentonite au cours de la fermentation alcoolique ne dégrade ni la couleur ni la qualité aromatique du vin contrairement au traitement de collage juste avant la mise en bouteilles. De plus il semblerait que l'apport de bentonite au début de la fermentation alcoolique diminue sa durée et accélère les fermentations languissantes. Les apports de bentonites ont un impact différent suivant le cépage et les doses utilisées. Par exemple pour un ajout de 40g.Hl-1 de bentonite, au soutirage et quelque soit le moment d'ajout le vin Vermentino ne possède plus de protéines alors que pour les vins Sauvignon et Chardonnay, respectivement un maximum de 35% et 40% de protéines par rapport au départ est quantifié. Pour obtenir des vins dépourvus de protéines après soutirage, il était nécessaire d'ajouter seulement 80g.Hl-1 de bentonite, l'emploi de fortes doses 150g.Hl-1 de bentonite était inutile. L'élimination des protéines est dépendante de la matrice vin mais aussi de la composition initiale du moût en protéines. Dans tous les cas, le fait d'ajouter la bentonite en même temps que les levures supprime l'étape supplémentaire de collage et par conséquent un gain de volume de vin avant la mise en bouteilles.

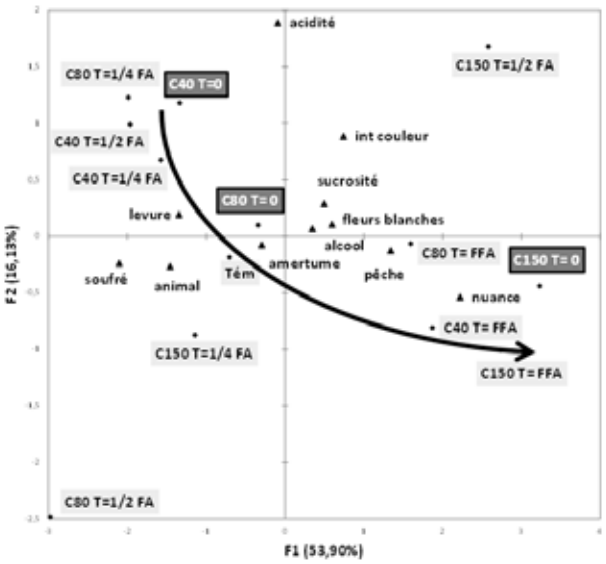

Figure 4 : Effet de la dose de bentonite ajoutée en début de fermentation sur les caractéristiques sensorielles

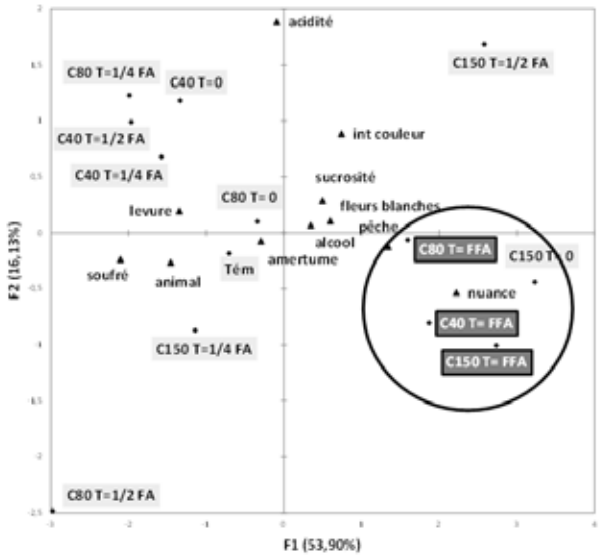

Figure 5 : Effet de la dose de bentonite ajoutée en fin de fermentation sur les caractéristiques sensorielles

Références bibliographiques

1- HSU J.C.ET HEARTHERBELL D.A.,1987a. Isolation and characterization of soluble proteins in grapes, grape juice and wine. . American Journal of Enology ans Viticulture, 38, 6-10.

2- HSU J.C.ET HEARTHERBELL D.A.,1987B. Heat-unstable proteins in wine. Characterization and removal by bentonite fining and heat treatment . American Journal of Enology ans Viticulture, 38, 11-16.

3- FERREIRA R.B., MONTEIRO S., PICARRA-PEREIRA M.-A., TANGANHO M .C., LOUREIRO V.-B. ET TEXEIRA A.R., 2000. Characterization of the Proteins From Grapes and Wines by Immunological Methods. American Journal of Enology ans Viticulture, 51, 22-28.

4- WATERS, E. J., SHIRLEY, N. J., &WILLIAMS, P. J. (1996). Nuisance pro-

teins of wine are grape pathogenesis-related proteins. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 44(1), 3-5.

5- SAUVAGE F-X., MANTEAU S., POINSAUT P., SIECZKOWSKI N. ET MOUTOUNET M., 2006, Haze forming protein in white wine: separation, identification and quantification of bentonite-absorbed and heat-induced haze active protein using 1D and 2D elecophoresis and MALDI-TOF mass spectrometry. Macromoleciles and Secondary Metabolites of Grpaes and Wine, Reims. pp. 169-175.

6- WATERS E.J.,WALLACE W., WILLIAMS P.J., 1992. Identification of heat-unstable wine proteins and their resistance to peptidases. Journal Agricultural and Food Chemistry, 40, 1514-1519.

7- DAWES H, BOYES S., KEENE J. ET HEATHERDELL D., 1994. Protein Instability of Wine : Influence of Protein Isoelectric Point. American Journal of Enology ans Viticulture, 45, 319-326.

8- SAUVAGE, F. X., BACH, B., MOUTOUNET, M., VERNHET, A., 2010. Proteins in white wines: Thermo-sensitivity and differential adsorbtion by bentonite. Food Chemistry 2010, 118, (1), 26-34.

9- BAYONOVE C., CABAROGLU T., DUFOUR C., RAZUNGLES A., SAPIS J .-C., BAUMES R. ET GUNATA Z., 1995. Influence du collage sur le potentiel aromatique variétal du vin. XXI Congrés de la Vigne et du Vin, OIV, Uruguay.

10- LAMBRI, M., DORDONI, R., SILVA, A., & DE FAVERI, D. (2010). Effect of Bentonite Fining on Odor-Active Compounds in Two Different White Wine Styles. American Journal of Viticulture and Enology, 61(2), 225-233.

11- WATERS E.J., ALEX G., MUHLACK R., POCOCK K.-F., COLBY C., O'NEILL B.-K., Hoj P.-B. et Jones P., 2005. Preventing protein haze in bottled white wine. The Australian Journal of Grape and Wine Research 11, 215-225.

12- WILLIAMS E.J., 1949. Experimental designs balanced for the estimation of residual effects of treatments. Australian Journal of Scientifics Research 2, 149-168.

NOTES

NOTES