

Impact d'une supplémentation en azote foliaire sur les vins de chardonnay et sauvignon blanc

Thibaut Verdenal, Jean-Laurent Spring, Ágnes Dienes-Nagy, Gilles Bourdin et Vivian Zufferey
Agroscope, 1009 Pully, Suisse

Renseignements: Thibaut Verdenal, e-mail: thibaut.verdenal@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs15-69> Date de publication: 19. Mars 2024



Domaine expérimental d'Agroscope à Nyon.

Résumé

La gestion raisonnée de la nutrition azotée de la vigne est cruciale pour la production durable de raisins et la qualité des vins. Les pratiques culturales dans nos vignobles évoluent progressivement vers une fertilisation réduite et davantage d'enherbement des sols, accentuant la concurrence azotée pour la vigne. La carence en azote du moût à la vendange est un problème fréquent lors de la vinification, surtout pour les vins blancs et rosés. Une étude conduite par Agroscope sur chardonnay et sauvignon blanc confirme que l'apport d'azote foliaire à la véraison augmente la concentration en azote assimilable des moûts, avec peu d'influence sur la vigueur de la vigne, dans le but de prévenir les risques de fermentation languissante et de déviation organoleptique des vins. Cependant, l'impact dépend du niveau initial de carence en azote de la plante: l'apport d'azote foliaire a été efficace

pour améliorer la qualité des vins issus de vignes modérément carencées en azote, mais n'a pas suffi en cas de carence sévère. Dans ce deuxième cas, le niveau d'azote assimilable dans le moût est resté inférieur au seuil critique de 140 mg N/L malgré la fertilisation et la qualité du vin n'a pas été améliorée de manière significative. Les seuils de carence en azote assimilable établis pour les moûts de chasselas ont pu être validés pour le chardonnay: le niveau d'azote assimilable est considéré comme très faible en dessous de 140 mg N/L de moût, faible entre 140 et 200 mg N/L et correct au-dessus de 200 mg N/L. Ces seuils doivent être confirmés pour le sauvignon blanc dans le contexte de cette étude.

Key words: urea, foliar fertilisation, yeast assimilable nitrogen, amino acids, deficiency thresholds.

Introduction

L'azote représente environ 1,5 % du poids sec de la vigne et entre dans la composition de métabolites clés tels que les protéines, les acides aminés, les enzymes, l'ADN et la chlorophylle. La gestion de la nutrition azotée de la vigne en vue d'un équilibre durable de la vigueur et du rendement est un réel challenge et implique tout d'abord la considération des conditions climatiques et du sol qui influent sur la disponibilité de l'azote minéral. Le vigneron peut ensuite optimiser la teneur en azote de la vigne et des raisins en adaptant ses décisions en termes de matériel végétal, d'entretien du sol, d'objectif de rendement et de fertilisation (Verdenal *et al.*, 2021). La gestion de l'azote au vignoble affecte la composition des raisins et en particulier la concentration de l'azote assimilable par les levures (acides aminés avec fonction amine primaire + ammonium; Bell & Henschke, 2005). C'est un paramètre crucial pour les vinifications de vins blancs, particulièrement affectées par la carence en azote des moûts (pressurage direct, débourbage parfois intensif). Lors de la fermentation alcoolique, les levures *Saccharomyces cerevisiae* consomment les acides aminés et l'ammonium comme nutriments pour assurer leur croissance et multiplication. Afin d'assurer une fermentation rapide et complète et éviter toute déviation organoleptique des vins, Spring & Lorenzini (2006) ont défini des seuils pour la variété chasselas en dessous desquels un apport d'azote est recommandé en cuve dès le début de fermentation: le niveau d'azote assimilable est considéré comme très faible en dessous de 140 mg N/L de moût, faible entre 140 et 200 mg N/L et correct au-dessus de 200 mg N/L. L'azote assimilable est également source de précurseurs des arômes variétaux dans les raisins. L'apport d'azote foliaire à la véraison permet ainsi d'augmenter la concentration de précurseurs des 3-mercaptophexanols (P-3MH), responsables des arômes caractéristiques de pamplemousse du sauvignon blanc (Peyrot des Gachons *et al.*, 2005; Lacroux *et al.*, 2008) et de l'arvine (Spring *et al.*, 2014). En termes de fertilisation de la vigne, les plus fortes concentrations en azote assimilable dans le moût sont obtenues lors d'une fertilisation azotée foliaire tardive au moment de la véraison (Verdenal *et al.*, 2015; Lasa *et al.*, 2012).

La nutrition azotée de la vigne est fortement influencée par la structure et la composition du sol. A titre d'exemple, le vignoble expérimental d'Agroscope à Nyon entraîne bien souvent des teneurs en azote assimilable plus faibles que d'autres sites avec un itinéraire technique pourtant identique. En cause, le sol est une moraine compacte et argileuse, hydromorphe en pro-

fondeur pendant l'hiver, et rapidement sèche en surface pendant l'été. Ces conditions contraignantes limitent fortement la minéralisation de l'azote et entraînent un enracinement de la vigne plus superficiel et moins résilient aux aléas climatiques (forte pluviométrie, sécheresse) (Reynard *et al.*, 2011). Dans ce contexte, un essai a été mis en place pour tester l'efficacité d'un apport azoté foliaire sur des vignes et les vins de chardonnay et de sauvignon blanc et ainsi valider pour ces deux variétés les seuils de carence en azote assimilable établis pour le chasselas.

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental

L'étude a eu lieu au vignoble expérimental d'Agroscope à Nyon. Le climat local est tempéré avec des températures mensuelles normales variant de 2,0°C en janvier à 20,2°C en juillet. Le profil du sol a été décrit par Changins en 2021: le sol est fait de moraine de fond compacte; c'est un calcosol silteux moyen à lourd avec 30 % d'argile, 1,1 % de matière organique, 30 % de calcaire total et un pH de 8,2. La réserve utile en eau est potentiellement élevée (250 cm), mais la vigne n'accède qu'à environ 150 cm, car les conditions rédoxiques du sol limitent son enracinement en profondeur.

En 1994, deux blocs de vignes, l'un de chardonnay et l'autre de sauvignon blanc (120 ceps chacun), ont été greffés sur 3309C puis plantés de manière uniforme dans une même parcelle, avec une densité de 7350 ceps par hectare et cultivés en guyot simple. Le chardonnay a été dégrappé chaque année (–3 grappes par bois en moyenne) avant la fermeture de grappe pour respecter les quotas de production régionaux, alors que le sauvignon blanc n'a pas nécessité de dégrappage. De 2006 à 2011, chaque bloc a été divisé en deux variantes: une variante témoin sans ajout d'azote et une variante avec une fertilisation de 20 kg N/ha d'urée foliaire, appliquée en quatre fois autour de la véraison.

Chaque année de 2006 à 2011, des mesures physiologiques, des analyses de moût et des analyses de vin ont été effectuées séparément pour les deux variétés. La vigueur de la vigne a été estimée en pesant 50 sarments par variante prélevés pendant l'hiver sur l'avant-dernière position de la branche à fruit (pas de mesure en 2006). La fertilité des bourgeons, c'est-à-dire le nombre de grappes par bois, a été estimée sur 20 ceps par variété. Les principaux éléments minéraux (N, P, K, Ca, Mg) ont été quantifiés sur des échantillons de 25 feuilles adultes

lavées prélevées dans la zone des grappes (limbe + pétiote) après le quatrième apport d'urée foliaire (laboratoire Sol-Conseil, Gland, Suisse). Le poids de baie a été estimé en pesant un échantillon de 200 baies juste avant vendanges (pas de mesure en 2006). A la vendange, les rendements ont été mesurés. Le poids de grappe a été estimé en fonction du nombre de grappes par cep et du rendement. Les raisins ont été foulés puis vinifiés par variété à la cave expérimentale d'Agroscope à Nyon selon un protocole standard. Un échantillon de moût par variété a été analysé par spectroscopie infrarouge (WineScan, FOSS): sucres solubles, acidité totale (en eq. acide tartrique), acides tartrique et malique, pH et azote assimilable par les levures. Les vins de sauvignon blanc étant caractérisés par leur forte teneur en arômes thiolés (buis, pamplemousse, fruit de la passion), la teneur des moûts de sauvignon blanc en précurseurs du 3-mercaptophexanal (P-3MH) a été mesurée en 2010 et 2011 par la HES-SO du Valais. Le profil organoleptique des vins a été évalué selon un descriptif prédéfini par le panel expert d'Agroscope.

Le traitement statistique des données a été réalisé avec le programme XLSTAT (Lumivero, Paris). La comparaison des variantes de l'essai a été faite avec une ANOVA à trois facteurs avec interactions (année × cépage × fertilisation × année*variété × année*fertilisation) suivie d'une analyse post-hoc (Tuckey, $p < 0,05$). Les données ont aussi été analysées par cépage avec des ANOVAs à deux facteurs (année*fertilisation). Les corrélations entre les variables mesurées et les discriminations entre les observations de l'essai ont été mises en valeur graphiquement par des analyses en composantes principales (ACP).

Résultats et discussion

Les observations viticoles, les analyses de moûts et les résultats de dégustation des vins sont résumés par année, variété et fertilisation dans le tableau 1. Aucune interaction année*variété ou année*fertilisation n'a été significative parmi les variables viticoles et les analyses de moût (p -value $> 0,05$).

Tableau 1 | Données viticoles et analyses des moûts, en fonction du millésime (2006 à 2011), du cépage (chardonnay ou sauvignon blanc) et de l'apport d'azote (0 ou 20 kg N/ha). «n.s.», non significatif; «-», $p < 0,10$; «*», $p < 0,05$; «**», $p < 0,01$; «***», $p < 0,001$. Pour les années, les données suivies de lettres différentes sont significativement distinctes (test de Tukey, $p < 0,05$).

| Variables | Années | | | | | | Chardonnay | | | Sauvignon blanc | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|------------------------------|---------|--------------------|------------------------------|---------|------|------|
| | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | p-value | Témoin (0 kg N/ha) | Apport foliaire (20 kg N/ha) | p-value | Témoin (0 kg N/ha) | Apport foliaire (20 kg N/ha) | p-value | | |
| Données viticoles | Fertilité (grappes par bois) | 1,6 b | 1,9 ab | 1,9 ab | 2,0 a | 1,8 ab | * | 1,8 | 1,9 | n.s. | 1,7 | 1,7 | n.s. | |
| | Dégrappage (grappes coupées par cep) | -1,0 a | -1,1 a | -1,7 a | -1,4 a | -2,3 a | n.s. | -2,9 | -3,1 | n.s. | - | - | - | |
| | N foliaire (% m.s.) | 1,72 b | 1,90 ab | 1,86 ab | 1,96 a | 1,89 ab | n.s. | 1,84 | 2,10 | ** | 1,63 | 1,90 | *** | |
| | P foliaire (% m.s.) | 0,32 bc | 0,44 a | 0,28 bc | 0,30 bc | 0,36 ab | ** | 0,28 | 0,25 | n.s. | 0,43 | 0,36 | ** | |
| | K foliaire (% m.s.) | 1,07 ab | 1,54 a | 1,19 ab | 1,18 ab | 0,91 b | * | 1,16 | 0,99 | n.s. | 1,18 | 1,26 | . | |
| | Ca foliaire (% m.s.) | 3,68 ab | 3,33 b | 3,40 ab | 4,04 a | 3,91 ab | * | 3,57 | 3,64 | n.s. | 3,76 | 3,51 | * | |
| | Mg foliaire (% m.s.) | 0,26 c | 0,35 ab | 0,33 bc | 0,42 a | 0,37 ab | ** | 0,38 | 0,34 | n.s. | 0,34 | 0,33 | n.s. | |
| | Poids des baies (g) | 1,6 ab | 1,7 ab | 1,9 a | 1,4 b | 1,6 ab | * | 1,5 | 1,6 | n.s. | 1,6 | 1,7 | * | |
| | Poids des grappes (g) | 147 bcd | 176 bc | 187 b | 133 cd | 248 a | *** | 161 | 156 | n.s. | 169 | 186 | * | |
| Rendement (kg/m ²) | 0,9 ab | 1,1 a | 0,9 a | 1,0 a | 1,1 a | * | 0,8 | 0,8 | n.s. | 1,0 | 1,2 | ** | | |
| Poids de bois de taille (g/m) | 64 a | 64 a | 52 a | 62 a | 48 a | n.s. | 63 | 64 | . | 49 | 57 | * | | |
| Moûts | Sucres (°Oe) | 90 bcd | 86 d | 94 abc | 97 a | 88 cd | ** | 94 | 93 | . | 91 | 89 | * | |
| | pH | 2,88 d | 3,03 c | 3,13 b | 3,20 a | 3,06 c | *** | 3,10 | 3,09 | n.s. | 2,99 | 3,02 | * | |
| | Acidité totale (g tartrique/L) | 11,2 b | 14,0 a | 9,7 b | 11,4 b | 9,4 b | ** | 10,4 | 11,1 | * | 11,0 | 11,2 | n.s. | |
| | Acide tartrique (g/L) | 9,0 a | 8,8 ab | 8,2 abc | 8,9 ab | 7,4 c | ** | 8,1 | 8,1 | n.s. | 8,8 | 8,4 | n.s. | |
| | Acide malique (g/L) | 4,3 b | 6,6 a | 3,0 b | 4,0 b | 3,5 b | ** | 4,0 | 4,6 | ** | 3,7 | 4,4 | ** | |
| | Azote assimilable (mg N/L) | 117 bc | 180 a | 113 bc | 157 ab | 88 c | ** | 125 | 194 | *** | 65 | 132 | *** | |
| | P-3MH (µg/L) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 11 | 18 | n.s. |
| | Indice de maturité (°Oe/ac. totale) | 8,1 ab | 6,2 b | 9,7 a | 8,5 ab | 9,8 a | * | 9,3 | 8,7 | ** | 8,5 | 8,2 | n.s. | |

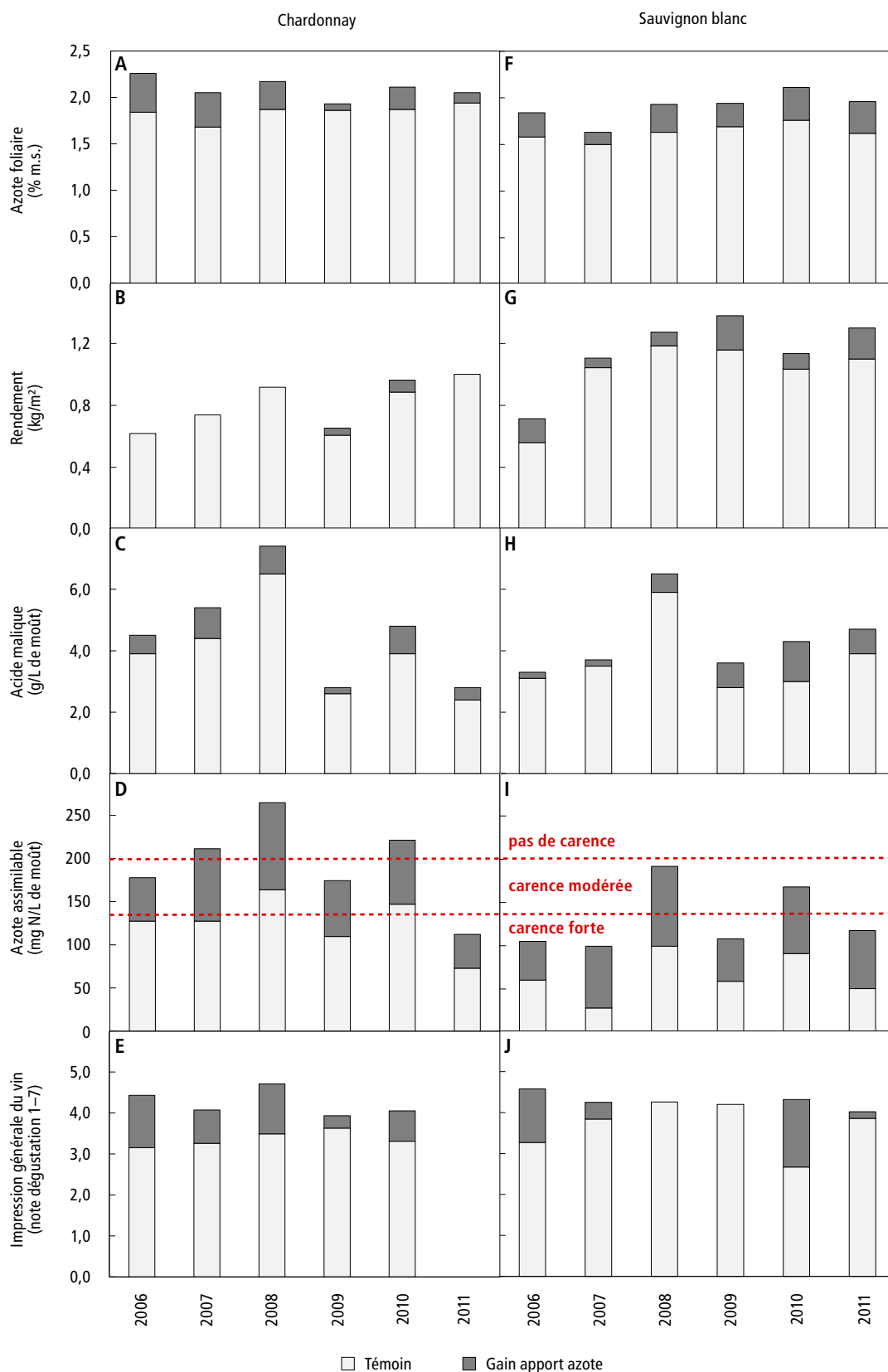


Figure 1 | Gains annuels (2006–2011) suite à un apport d'azote foliaire à la véraison sur chardonnay (A, B, C, D, E) et sur sauvignon blanc (F, G, H, I, J), en termes d'azote foliaire, rendement, acide malique et azote assimilable par les levures dans le moût et impression générale du vin à la dégustation.

La fertilité moyenne sur six ans a été de $1,8 \pm 1,2$ grappes par bois pour le chardonnay et $1,7 \pm 1,2$ pour le sauvignon blanc; elle a varié en fonction de l'année, sans effet significatif de la variété ou de la fertilisation foliaire. L'analyse des minéraux dans les feuilles a révélé une teneur moyenne en azote correcte pour le chardonnay ($1,97\%$ m.s.) et plus faible pour le sauvignon blanc ($1,77\%$ m.s.), selon les seuils établis pour le chasselas (Spring & Verdenal, 2017). Une teneur en potassium plutôt faible pour les deux variétés et des teneurs en phosphore, calcium et magnésium suffisantes ont également été notées. En moyenne sur six ans, la fertilisation foliaire a permis d'augmenter la teneur en azote de la plante de $0,26 \pm 0,11\%$ m.s. (Figure 1A et 1F) et a légèrement réduit la teneur en phosphore de $0,06 \pm 0,05\%$ m.s., sans impact sur les autres minéraux. Les poids moyens de baie et de grappe ont été respectivement de $1,6 \pm 0,2$ g et 159 ± 42 g pour le chardonnay et de $1,7 \pm 0,2$ g et 177 ± 54 g pour le sauvignon blanc. Les composantes du rendement du chardonnay n'ont pas été influencées par la fertilisation foliaire, alors que pour le sauvignon blanc, les poids moyens de baie ($+0,1$ g) et de grappe ($+17$ g) ainsi que le rendement ($+0,2$ kg/m²) ont augmenté en moyenne sur six ans (Figure 1B et 1G). Les poids moyens des bois de taille ont été de $63,1 \pm 14,5$ g/m pour le chardonnay et de $52,8 \pm 5,1$ g pour le sauvignon blanc. La fertilisation a augmenté la vigueur du sauvignon blanc avec un gain moyen du poids des bois de taille de $7,4$ g/m et a eu un effet négligeable sur la vigueur du chardonnay.

Les analyses de moûts ont varié essentiellement en fonction de l'année, ce qui révèle l'impact dominant des conditions climatiques. La fertilisation a légèrement affecté l'indice moyen de maturité du chardonnay à la vendange ($-0,6$), mais pas celui du sauvignon blanc. La fertilisation a surtout augmenté les concentrations en acide malique ($+0,7$ g/L pour les deux variétés; Figure 1C et 1H) et en azote assimilable ($+69$ mg/L pour le chardonnay et $+67$ mg/L pour le sauvignon blanc; Figure 1D et 1I). Suite à la fertilisation foliaire, la concentration moyenne en azote assimilable du témoin chardonnay est passée d'un niveau de carence forte (125 ± 32 mg N/L) à un niveau correct (194 ± 52 mg N/L) alors que celle du témoin sauvignon blanc était si faible (65 ± 26 mg N/L) qu'elle est restée à un niveau de carence forte malgré la correction azotée (132 ± 39 mg N/L). La concentration en P-3MH des moûts de sauvignon blanc a été de 11 ng/L dans le témoin et 18 ng/L dans la variante avec apport d'azote foliaire, des concentrations plutôt faibles et sans différence significative (seulement deux années de résultats); cela dit, la tendance de ces résultats confirme l'effet positif de l'apport d'azote foliaire sur la concentration des composés volatils dans les raisins (Peyrot des Gachons *et al.*, 2005; Lacroux *et al.*, 2008).

La dégustation des vins a montré un impact positif de la fertilisation foliaire variable en fonction de la variété. Les vins de chardonnay issus des variantes fertilisées ont donné une meilleure impression générale lors de la dégustation par rapport aux vins témoins de la même

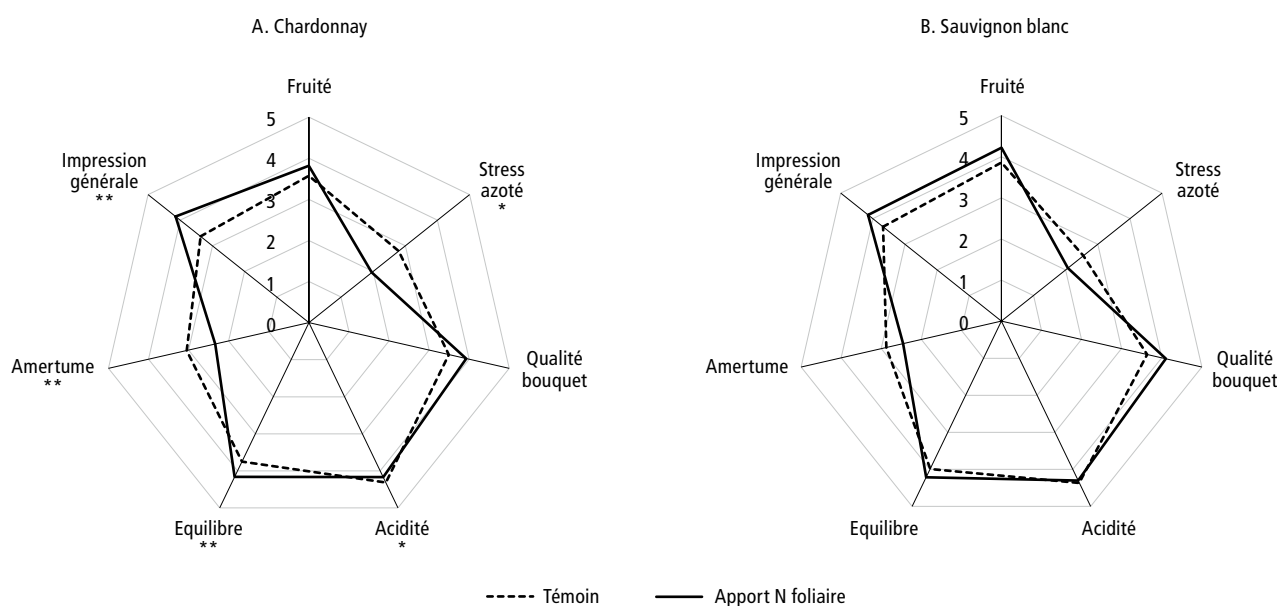


Figure 2 | Comparaison des profils organoleptiques des vins issus des variantes témoin (0 kg N/ha) et apport d'azote foliaire (20 kg N/ha) pour le chardonnay (A) et le sauvignon blanc (B). Moyennes 2006–2011. Analyse des variances: «.», $p < 0,10$; «*», $p < 0,05$; «**», $p < 0,01$.

année. La finesse de leur bouquet a été mise en avant avec notamment moins d'arômes négatifs liés au stress azoté des moûts. En bouche, ces mêmes vins ont eu un meilleur équilibre lié à une acidité légèrement moins marquée et surtout une amertume et une astringence nettement moins présentes (Figure 2). Les vins de sauvignon blanc ont présenté les mêmes tendances que pour le chardonnay, mais les différences ont été moins marquées et non significatives. La différence en termes d'impression générale pour les vins de sauvignon blanc a été nulle ou négligeable quatre années sur les six années d'essai (Figure 1E et 1J).

Les analyses en composantes principales des données collectées pendant six ans sur vigne, moûts et vins sont très similaires pour le chardonnay et le sauvignon blanc (Figure 3). Cela traduit un comportement physiologique

comparable des deux variétés en fonction du millésime et de la fertilisation. Les graphiques des vecteurs (Figures 3A et 3C) montrent une corrélation positive suivant l'axe F1 des variables de nutrition azotée de la vigne et du moût avec les descriptifs hédoniques des vins tels que la finesse du bouquet et l'impression générale. Les descriptifs qualitatifs des vins (fruité, équilibre gustatif) sont corrélés négativement aux arômes de stress azoté (foin, serpillère, cire) et à l'amertume en bouche. La maturité des raisins à la vendange, représentée par la concentration des moûts en sucres solubles et acides, ne semble, quant à elle, pas corrélée avec la nutrition azotée et la qualité des vins. Sur les graphiques des observations (Figures 3B et 3D), une discrimination apparaît sur l'axe F1 entre les variantes témoins sans azote et les variantes fertilisées, ces dernières étant plus riches en

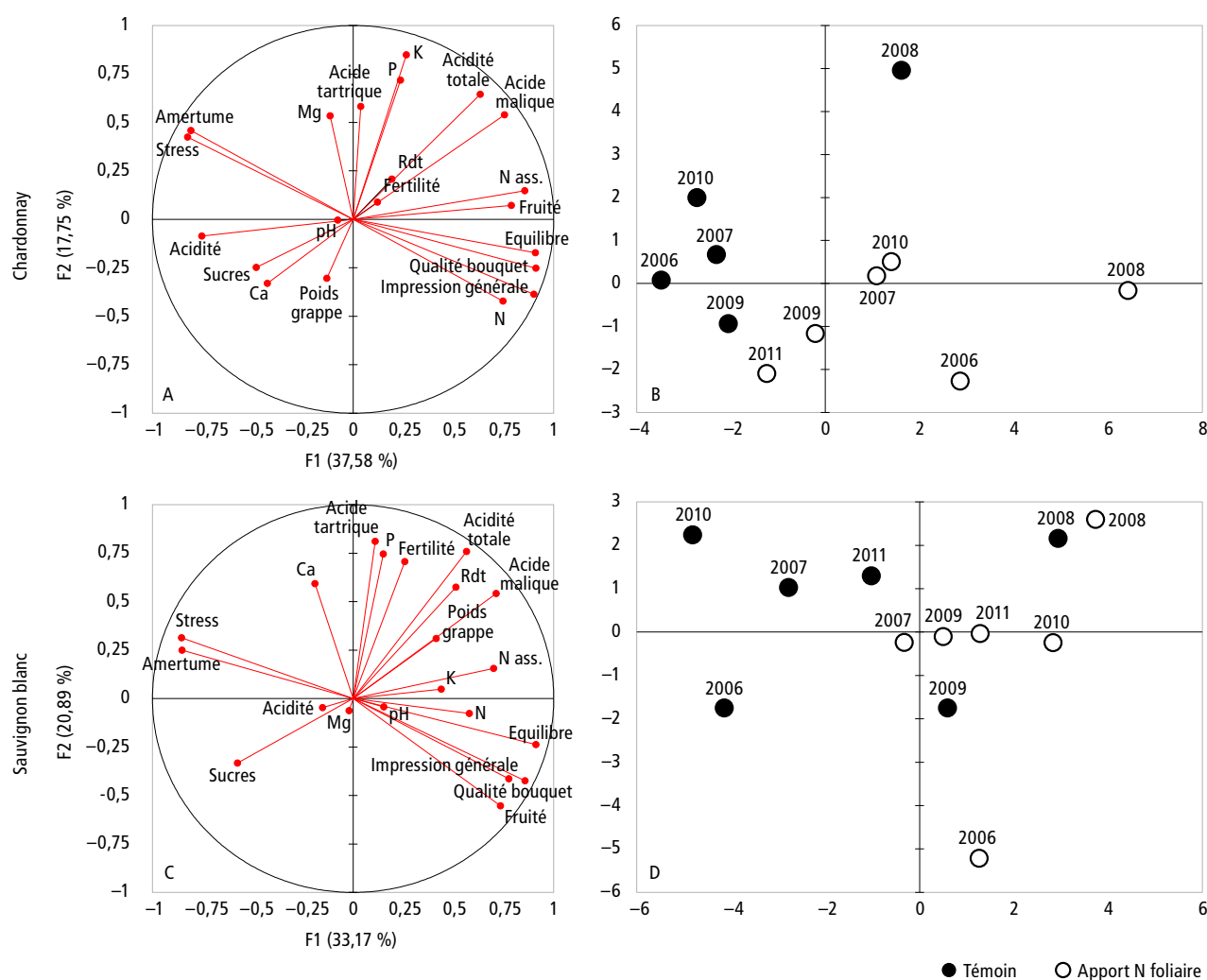


Figure 3 | Analyses en composantes principales (ACP) pour le chardonnay (A et B) et le Sauvignon blanc (C et D). Les graphiques des vecteurs (à gauche) présentent les corrélations entre les variables mesurées sur vigne, moûts et vins pendant 6 ans. Les graphiques de droite discriminent les observations en fonction de l'année et de la fertilisation; plus les points sont proches, plus les observations présentent des résultats similaires.

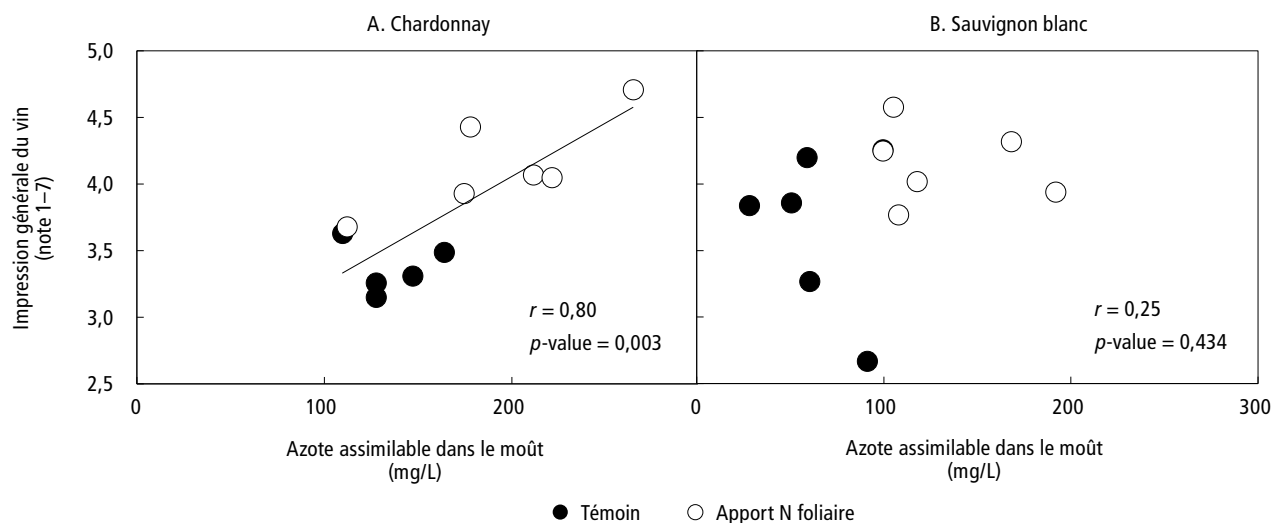


Figure 4 | Corrélations entre la concentration en azote assimilable dans le moût à la vendange et l'impression générale des vins lors de la dégustation pour le chardonnay (A) et le sauvignon blanc (B), sur la période 2006–2011. Chaque année comprend une variante témoin non fertilisée (0 kg N/ha, points noirs) et une variante avec apport d'azote foliaire (20 kg/ha, points blancs).

azote à la vigne et dans les moûts. Cette discrimination est plus nette dans le cas du chardonnay que dans celui du sauvignon blanc. Bien qu'il n'y ait pas d'interaction cépage*azote, les différences entre les vins ont été significatives dans le cas du chardonnay, mais pas dans le cas du sauvignon blanc dans le contexte de cet essai. La corrélation entre la teneur en azote assimilable du moût et l'impression générale donnée par le vin a été hautement significative pour le chardonnay ($p=0,003$), alors qu'elle a été négligeable pour le sauvignon blanc (Figure 4).

En résumé, les vignes de sauvignon blanc ont montré des signes de carence en azote plus marqués que les vignes de chardonnay dans des conditions de culture équivalentes, soulignant l'influence de la génétique sur la nutrition azotée de la plante (Stines *et al.*, 2000; Zapata *et al.*, 2004). Dans le cas du chardonnay, la vigne a été modérément carencée en azote (1,84 % m.s.); suite à la fertilisation foliaire, le moût a atteint un niveau correct d'azote et la qualité du vin a été améliorée; la vigueur de la vigne et les composantes du rendement n'ont pas été influencées. Dans le cas du sauvignon blanc, la carence en azote à la vigne était plus forte (1,63 % m.s.) avec des signes de manque de vigueur; la fertilisation foliaire a légèrement augmenté la vigueur et les composantes du rendement; le moût est resté à un niveau de forte carence azotée (azote assimilable < 140 mg/L) et la qualité du vin n'a pas été améliorée; la teneur en P-3MH est restée faible. Il semble donc que les seuils établis par Spring & Lorenzini (2006) pour le chasselas sont également valables pour le chardonnay, mais doivent être confirmés pour le sauvignon blanc. Il serait souhai-

table de reproduire et compléter cet essai par des suivis de maturation et analyses plus approfondies des moûts, afin de comprendre les mécanismes physiologiques en jeu dans la formation et l'accumulation des composés azotés et volatils dans les raisins. ■

Conclusions

- L'apport d'azote foliaire à la véraison est une solution efficace pour augmenter la concentration en azote assimilable du moût, avec peu d'influence sur la vigueur de la vigne.
- L'apport d'azote foliaire a amélioré la qualité des vins issus de vignes modérément carencées en azote, mais n'a pas suffi en cas de carence sévère, nécessitant d'abord le rétablissement de l'équilibre nutritionnel à la vigne.
- Les seuils de carence en azote assimilable établis pour les moûts de chasselas ont pu être validés pour le chardonnay, mais doivent être confirmés pour le sauvignon blanc.
- Les vignes de sauvignon blanc ont montré des signes de carence en azote plus marqués que les vignes de chardonnay dans des conditions de culture équivalentes, soulignant l'influence de la génétique sur la nutrition azotée de la plante.

Remerciements

Nous tenons à souligner le travail précieux de l'équipe technique du groupe Viticulture à Agroscope pour l'entretien du vignoble expérimental et l'aide consciencieuse de Florent Leyvraz (étudiant ETH Zurich) pour le traitement et la mise en valeur des données.

Bibliographie

- Bell, S.-J., & Henschke, P. A. (2005). Implications of nitrogen nutrition for grapes, fermentation and wine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **11**, 242-295. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2005.tb00028.x>
- Lacroux, F., Tregoat, O., van Leeuwen, C., Pons, A., Tominaga, T., Lavigne-Cruège, V., & Dubourdieu, D. (2008). Effect of foliar nitrogen and sulfur application on aromatic expression of *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon blanc. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, **42**(3), 125-132.
- Lasa, B., Menendez, S., Sagastizabal, K., Cervantes, M. E. C., Irigoyen, I., Muro, J., Aparicio-Tejo, P. M., & Ariz, I. (2012). Foliar application of urea to "Sauvignon Blanc" and "Merlot" vines: doses and time of application. *Plant Growth Regulation*, **67**(1), 73-81. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9667-5>
- Peyrot des Gachons, C., Leeuwen, C. V., Tominaga, T., Soyer, J.-P., Gaudillre, J.-P., & Dubourdieu, D. (2005). Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon blanc in field conditions. *J Sci Food Agric*, **85**(1), 73-85. <https://doi.org/10.1002/jfsa.1919>
- Reynard, J. S., Zufferey, V., Nicol, G. C., & Murisier, F. (2011). Soil parameters impact the vine-fruit-wine continuum by altering vine nitrogen status. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, **45**(4), 211-221.
- Spring J.-L., & Lorenzini F. (2006). Effet de la pulvérisation foliaire d'urée sur l'alimentation azotée et la qualité du Chasselas en vigne enherbée. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **38** (2), 105-113
- Spring J.-L., Zufferey V., Dienes-Nagy Á., Lorenzini F., Frey U., Thibon C., Darriet P. & Viret O. (2014). Effet de l'alimentation azotée sur le comportement et la typicité des vins de l'Arvine. *Revue suisse de viticulture arboriculture horticulture*, **46**(4), 244-253.
- Spring, J. L., & Verdenal, T. (2017). Fertilisation en viticulture : Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse. *Recherche Agronomique Suisse*, **8**, chapter 12.
- Stines, A. P., Grubb, J., Gockowiak, H., Henschke, P. A., Hoj, P. B., & Van Heeswijck, R. (2000). Proline and arginine accumulation in developing berries of *Vitis vinifera* L. in Australian vineyards: Influence of vine cultivar, berry maturity and tissue type. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **6**, 150-158. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00174.x>
- Verdenal, T., Spangenberg, J. E., Zufferey, V., Lorenzini, F., Spring, J. L., & Viret, O. (2015). Effect of fertilisation timing on the partitioning of foliar-applied nitrogen in *Vitis vinifera* cv. Chasselas: a ¹⁵N labelling approach. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **21**(1), 110-117. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12116>
- Verdenal, T., Dienes-Nagy, Á., Spangenberg, J. E., Zufferey, V., Spring, J.-L., Viret, O., Marin-Carbonne, J., & van Leeuwen, C. (2021). Understanding and managing nitrogen nutrition in grapevine: a review. *Oeno One*, **55**, 1-43. <https://doi.org/10.20870/oenone.2021.55.1.3866>
- 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**, 1127-1135. <https://doi.org/10.1071/FP04028>