

Impact de la zone d'application de l'urée foliaire sur la teneur en azote des raisins

Thibaut VERDENAL¹, Vivian ZUFFEREY¹, Jean-Laurent SPRING¹, Ágnes DIENES-NAGY², Sandrine BELCHER²
et Fabrice LORENZINI²

¹Agroscope, 1009 Pully, Suisse

²Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

Renseignements: Thibaut Verdenal, e-mail: thibaut.verdenal@agroscope.admin.ch, tél. +41 58 468 65 60, www.agroscope.ch



Application d'urée foliaire à la vigne (photo: Mélanie Huberty).

Introduction

On admet qu'une teneur minimum de 140 mg d'azote assimilable (N_{ass}) par litre de moût est nécessaire pour garantir une bonne cinétique de fermentation et une

transformation complète des sucres en alcool. Cela est particulièrement vrai pour les cépages blancs vinifiés sans macération pelliculaire (Bell et Henschke 2005; Spring et Lorenzini 2006; Hannam *et al.* 2013). Dans le cas d'un moût carencé en azote, la quantité d'azote assimilable (N_{ass}) peut être ajustée avec un apport de phosphate d'ammonium en début de fermentation. Bien que cette technique soit préconisée, on accorde aujourd'hui une grande importance à la concentration initiale en N_{ass} des raisins, qui dépend surtout du statut azoté de la vigne. En effet, malgré un ajout d'azote en moût, sa composition ne sera pas équivalente à celle d'un moût initialement équilibré, ce dernier contenant certains acides aminés qui jouent un rôle primordial dans la formation du bouquet du vin (Lorenzini et Vuichard 2012).

La carence azotée des moûts n'est pas uniquement liée à la disponibilité en azote des sols. De nombreuses études ont montré que la teneur en N_{ass} des moûts peut être influencée par le choix du matériel végétal (Spring *et al.* 2016), par l'entretien du sol (Spring *et al.* 2014), par la gestion de la surface foliaire (Spring *et al.* 2012), par l'alimentation hydrique (Zufferey *et al.* 2010) et par la fertilisation (Spring *et al.* 2014). Une gestion intégrée de la vigueur de la vigne et du rendement est ainsi nécessaire pour gérer la composition des raisins et produire au final un vin de qualité.

L'expression végétative, le développement des grappes et la couleur du feuillage sont souvent révélateurs de la présence ou non d'une carence azotée. Le statut azoté de la vigne peut être suivi en cours de saison par des mesures directes ou indirectes:

- Analyse foliaire en laboratoire qui détermine la teneur en azote (% matière sèche) d'un échantillon de feuilles.
- Indice chlorophyllien, qui mesure de façon non destructive (rayons proche infra-rouge) la teneur en chlorophylle des feuilles, elle-même fortement corrélée à la teneur en azote.

Sous réserve d'une bonne alimentation azotée de la vigne, ce sont souvent les mêmes parcelles de vignes qui présentent des carences azotées dans les moûts (Reynard *et al.* 2011). Dans ce cas, l'apport d'urée foliaire $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ à la vigne est une technique d'appoint reconnue pour ajuster à court terme la teneur en N_{ass} des raisins (Spring et Lorenzini 2006; Lacroux *et al.* 2008; Hannam *et al.* 2013; Verdenal *et al.* 2016). En appliquant 10 à 20 kg N/ha d'urée sur le feuillage au moment de la véraison, l'azote assimilé est préférentiellement accumulé dans les raisins sous forme de N_{ass} et peu utilisé pour la croissance de la vigne (Lasa *et al.* 2012; Verdenal *et al.* 2015). Le fractionnement de l'apport – 5 kg N/ha par passage une fois par semaine – et le mouillage du feuillage – environ 300 l/ha – permettent une assimilation rapide et la prévention de brûlures sur les feuilles dans des conditions plus sèches et chaudes, dues à la phyto-toxicité du biuret (fig. 1). Pour l'heure, aucune étude n'a démontré quelle zone du feuillage assimilait le mieux l'urée lors de sa pulvérisation.

Cet article présente les résultats d'un essai ayant pour but de définir la zone du feuillage à traiter lors de l'application d'urée pour obtenir une accumulation optimale de N_{ass} dans les raisins. Nous espérons ainsi répondre au questionnement des viticulteurs.

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental

L'essai a été conduit de 2012 à 2016 dans le vignoble expérimental d'Agroscope à Changins (VD, Suisse). Les précipitations annuelles de la région sont de 998 mm et la température moyenne journalière pendant la période végétative de la vigne (avril–octobre) de 15,0 °C (normale 1981–2010, station de Changins, Météo Suisse). Le sol est un calcosol rédoxique issu de mo-



Figure 1 | Symptômes de brûlure sur les feuilles, dus à un excès d'urée foliaire (photo Mélanie Huberty, 2016).

Résumé La teneur en azote assimilable est aujourd'hui reconnue comme un critère essentiel de la composition des moûts de raisin. Elle influence le bon déroulement de la fermentation ainsi que le profil organoleptique final du vin, notamment lors des vinifications en blanc sans macération pelliculaire. Cet article précise dans quel contexte une application d'urée foliaire peut être une solution d'appoint intéressante pour rehausser les teneurs en azote assimilable des moûts. Un essai mené de 2012 à 2016 a montré qu'une application sur l'ensemble du feuillage est préférable à une application sur une zone particulière. Un suivi et une gestion intégrée du statut azoté de la vigne et du moût permettrait de maîtriser les risques de carence azotée des moûts.

raines de fond compactes. La zone d'enracinement est moyennement profonde (150 cm) et la réserve utile en eau du sol avoisine 180 mm.

La parcelle de l'essai a été plantée en 2003 de façon homogène avec du Chasselas (clone 800; porte-greffe 3309C) à une densité de 5880 ceps/ha (2,00x0,85 m). Les vignes ont été taillées en Guyot simple (sept rameaux par cep) et entretenues de façon conventionnelle: les entre-cœurs ont été enlevés dans la zone des grappes; un dégrappage a été réalisé chaque année en juillet afin de ne garder que cinq à sept grappes par cep; la hauteur de feuillage a été maintenue à 1,20 m par un rognage régulier; aucun traitement anti-botrytis n'a été appliqué pendant la période de l'essai. Cette parcelle présente régulièrement de faibles teneurs en N_{ass} dans les moûts.

Quatre blocs homogènes (répétitions) ont été mis en place sur la parcelle, composés chacun de quatre variantes disposées aléatoirement (douze ceps chacune): (A) témoin sans urée foliaire, (B) application de l'urée sur le feuillage entier, (C) application de l'urée sur la moitié haute du feuillage et (D) application de l'urée sur la moitié basse du feuillage (y compris la zone des grappes). Les applications d'urée ont eu lieu chaque année à la période de la véraison. Au total, 20 kg N/ha ont été appliqués annuellement en quatre fois à l'atomiseur (dilution 3,8 % m/v d'urée) des deux côtés du rang. Des rangs de vignes tampons ont permis d'éviter les dérives d'urée entre les variantes. Aucun autre engrais n'a été apporté dans le cadre de cet essai. Aucun résultat n'a pu être collecté en 2013, en raison de la grêle du 21 juin.

Mesures et calculs

Le développement végétatif et la vigueur de la vigne ont été observés dans chaque variante au cours de la saison: stades phénologiques du débourrement et de la floraison; surface foliaire exposée au mois d'août (SFE); poids des bois de taille (dix bois par variante taillés à un mètre). L'indice chlorophyllien a été mesuré une fois par mois de juin à septembre dans la zone des grappes (N-tester, Yara, Paris). Une analyse foliaire a été réalisée après les applications d'urée sur des échantillons de feuilles prélevées dans la zone des grappes pour déterminer la teneur en N, P, K Mg et Ca dans les feuilles en début de maturation (Laboratoire Sol-Conseil, Gland, VD). Les indices chlorophylliens et les résultats des analyses foliaires ont été interprétés avec les seuils déterminés par Spring et Verdenal (2017). Les composantes du rendement ont été mesurées: fertilité; rendement; poids moyens des grappes et des baies à la vendange. Les échantillons de moût prélevés à la vendange ont été analysés avec un spectrophotomètre à infrarouge (Winescan, FOSS, Hillerød, Denmark), afin de quantifier le pH, les sucres, l'acidité totale et les acides tartrique et malique. Les concentrations en ammonium (NH_4^+) et en acides aminés libres (AA) ont été déterminées séparément en 2014, 2015 et 2016, par spectrophotométrie (méthode A25, BioSystems, Barcelone, Espagne). L'azote assimilable (N_{ass} , mg N/l) a été calculé en additionnant les teneurs en AA primaires et NH_4^+ .

Les analyses statistiques ont été réalisées avec XLS-TAT (Version 2016.02.28635, Addinsoft, Paris, France). Les différences entre variantes ont été déterminées par analyses de variance à trois facteurs (année/variable/répétition, $P < 0,05$), complétées par des tests de Newman-Keuls, en considérant les années comme facteur aléatoire.

Résultats

Développement végétatif et vigueur

Les quatre variantes ont montré un développement végétatif identique durant les quatre années de l'essai. Aucun décalage phénologique n'a pu être observé entre les variantes, tant au débourrement qu'à la floraison, et la surface foliaire exposée mesurée peu avant la véraison était constante ($1,4 \text{ m}^2 \text{ SFE/m}^2$ de sol en moyenne sur quatre ans) (tabl. 1). Les poids moyens des bois de taille n'ont indiqué aucune différence de vigueur entre variantes (tabl. 1). En 2014, la vigueur était globalement plus faible que lors des trois autres millésimes: 53 g/m par rapport à une moyenne de 66 g/m . En 2016 surtout, des symptômes de brûlure sont apparus sur les feuilles ayant reçu l'urée (fig. 1).

Alimentation minérale

En moyenne sur quatre ans, le suivi de l'alimentation azotée de la vigne par la mesure mensuelle de l'indice chlorophyllien a montré des différences entre variantes en juillet seulement (tabl. 1). Elles sont de l'ordre de ± 10 , soit négligeables en termes de réponse physiologique de la plante.

Par contre, la variabilité inter-millésime a été importante (452 ± 24 en moyenne): les indices moyens mesurés à la véraison ont indiqué, pour toutes les variantes, une teneur en azote normale en 2012, 2015 et 2016 et très faible en 2014. Les diagnostics foliaires ont confirmé ces résultats: de bonnes teneurs en 2012, 2015 et 2016 (moyenne $2,1 \text{ \% m.s.}$) et une très faible teneur en 2014 ($1,7 \text{ \% m.s.}$). Les résultats particuliers du millésime 2014 (alimentation minérale et vigueur de la vigne) sont vraisemblablement dus aux arrière-effets de la forte grêle de 2013.

Tableau 1 | Influence de la zone d'application de l'urée foliaire sur le développement végétatif de la vigne et sur la composition minérale des feuilles. Les valeurs suivies de différentes lettres sur une même ligne sont significativement différentes selon le test de Newman-Keuls ($P \text{ value} < 0,05$).

	A Témoin sans urée	B Application feuillage entier	C Application haut du feuillage	D Application bas du feuillage
SFE (m^2/m^2 sol)	1,4	1,4	1,4	1,4
Poids bois de taille (g/m)	64	63	62	63
N-tester mi-juin	408	405	393	399
N-tester mi-juillet	461 a	453 ab	450 ab	444b
N-tester mi-août	464	453	464	455
N-tester mi-septembre	453	454	457	453
Azote (% m.s. feuille)	1,8 b	2,1 a	1,9 b	2,1 a
Phosphore (% m.s. feuille)	0,2	0,2	0,2	0,2
Potassium (% m.s. feuille)	1,2	1,2	1,2	1,3
Calcium (% m.s. feuille)	3,4 a	3,2 b	3,4 a	3,2 b
Magnésium (% m.s. feuille)	0,4	0,3	0,4	0,3

Les teneurs en azote des feuilles des variantes (B) et (D) ont été légèrement plus élevées (2,1 % m.s.) (tabl. 1), probablement en raison d'un apport d'urée sur les feuilles de la zone des grappes où les mesures ont été faites. Par ailleurs, il n'y a pas eu de carence en phosphore; les teneurs en potassium étaient globalement faibles; les teneurs en calcium étaient bonnes à élevées, avec des valeurs légèrement plus faibles pour les variantes (B) et (D); enfin, les teneurs en magnésium étaient élevées (tabl. 1).

Composantes du rendement

Le millésime a fortement affecté la fertilité et le rendement. La fertilité a été particulièrement faible en 2014, avec une moyenne de seulement 1,6 grappes par bois (contre 2,0 pour les trois autres millésimes). Les rendements ont également été globalement plus faibles en 2014 (arrière-effet de la grêle) et en 2015 (forte sécheresse). Toutefois, il n'y a pas eu de différence significative entre les variantes (tabl. 2). A l'inverse, en 2012 et 2016, les rendements ont été supérieurs à 2,0 kg/m², en raison d'une fertilité élevée (2,0 grappes par bois), de poids des grappes et de baies supérieurs (respectivement 640 g et 3,6 g en moyenne pour ces deux millésimes) et d'un dégrappage moins intensif (sept grappes conservées par cep). Malgré la grande variabilité intermillésime, la variante B a régulièrement présenté des grappes plus petites (en moyenne 9 %) que celles des variantes A et D, différences toutefois sans conséquence significative sur les rendements (tabl. 2).

Les rapports feuille-fruit ont varié uniquement en fonction des millésimes, en raison de la variabilité des rendements: ils ont été équilibrés en 2014 et 2015 (1,1 m²SFE/kg en moyenne) et faibles en 2012 et 2016 (0,6 m²SFE/kg en moyenne), sans aucune différence significative entre variantes (tabl. 2).

Tableau 2 | Influence de la zone d'application de l'urée foliaire sur les composantes du rendement et sur la composition du moût à la vendange. Les valeurs suivies de différentes lettres sur une même ligne sont significativement différentes selon le test de Newman-Keuls (P value < 0,05).

	A Témoin sans urée	B Application feuillage entier	C Application haut du feuillage	D Application bas du feuillage
Fertilité (grappes/bois)	1,9	1,9	2,0	1,9
Rendement (kg/m ²)	1,8	1,7	1,7	1,8
Poids grappe vendange (g)	520 a	472 b	488 ab	515 a
Poids baie vendange (g)	3,2	3,2	3,2	3,3
Rapport feuille/fruit (m ² /kg)	0,8	0,9	0,9	0,8
Sucres (°Oe)	76	77	76	76
pH	3,2 b	3,3 a	3,3 a	3,3 a
Acidité totale (g/l éq. ac. tart.)	6,2	6,3	6,3	6,3
Acide tartrique (g/l)	5,4 b	5,6 a	5,6 a	5,5 ab
Acide malique (g/l)	2,6 b	2,8 a	2,8 a	2,8 a

Composition du moût

La maturité des raisins à la vendange a été principalement affectée par les conditions de maturation de l'année. Ainsi, la forte sécheresse de 2015 a favorisé une teneur en sucres élevée (82 °Oe contre une moyenne de 74 °Oe pour les autres millésimes) et une acidité totale faible (5,5 g/l contre une moyenne de 6,5 g/l), en raison notamment de la dégradation de l'acide malique (seulement 1,7 g/l à la vendange). A l'inverse, les vendanges de 2014 ont présenté l'acidité totale la plus élevée (7,1 g/l) et un pH bas (3,2, contre une moyenne de 3,3).

En comparant les quatre variantes, on observe que l'application de l'urée n'a pas eu d'impact sur la teneur en sucres et sur l'acidité totale des moûts (tabl. 2). En revanche, la variante témoin A a régulièrement présenté un pH plus bas (-0,1) ainsi que des teneurs en acide tar-

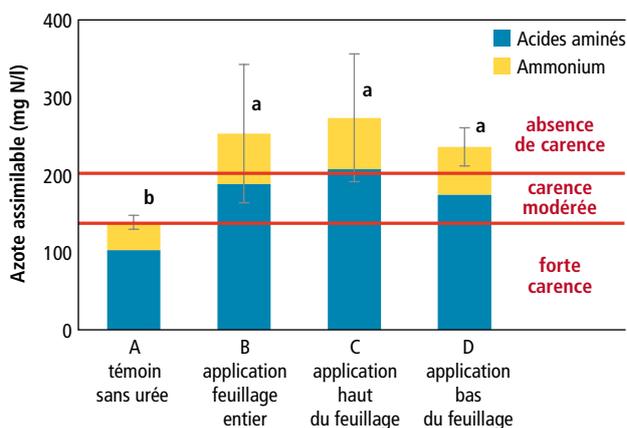


Figure 2 | Teneurs en azote assimilable des moûts (acides aminés + ammonium, moyenne 2014–2016). $N_{\text{ass}} > 200$ mg/l, absence de carence azotée. $140 < N_{\text{ass}} < 200$ mg/l, carence modérée. $N_{\text{ass}} < 140$ mg/l, carence forte. Les valeurs avec différentes lettres sont significativement différentes selon le test de Newman-Keuls (P value < 0,05).

trique et malique plus faibles ($-0,2\text{g/l}$ en moyenne) (tabl. 2). La zone d'application de l'urée n'a pas non plus eu d'influence: aucune différence significative n'a pu être observée entre les variantes B, C et D.

L'apport d'urée a fortement augmenté la teneur en N_{ass} quels que soient le millésime et la zone d'application ($+115\text{mgN/l}$ en moyenne par rapport au témoin) (fig. 1). Le gain a été particulièrement important en 2016: $+187\text{mgN/l}$, soit une augmentation de près de 150%. La variante témoin A a présenté chaque année des teneurs en N_{ass} basses, à la limite d'une forte carence ($<140\text{mgN/l}$) (fig. 1), alors que les variantes avec urée B, C et D n'ont eu aucune carence en N_{ass} ($N_{\text{ass}} > 200\text{mg/l}$) (fig. 1). Les proportions d'ammonium et d'acides aminés sont restées les mêmes avec ou sans apport d'urée. Aucune différence significative n'a pu être observée entre les variantes B, C et D.

Discussion

L'ajustement final de la teneur en N_{ass} des moûts se fait à la cave. Malgré cet ajout, sa composition n'est pas équivalente à celle d'un moût initialement équilibré. Il ressort qu'une bonne gestion de l'alimentation azotée de la vigne est déterminante et qu'elle nécessite une vision intégrée des techniques culturales. Dans les sites prédisposés à la carence azotée – tels que le vignoble d'Agroscope à Changins –, nos essais ont montré que l'apport d'urée foliaire semble être une solution d'appoint efficace pour supprimer les carences en N_{ass} des moûts. L'application de l'urée sur une zone particulière du feuillage n'a présenté aucun intérêt et pourrait même, dans certaines conditions, augmenter les symptômes de brûlure sur les feuilles. Aussi, nous recommandons d'augmenter la surface d'absorption de l'azote en traitant la surface entière du feuillage. A relever qu'un apport systématique d'urée foliaire, sans connaissance du statut azoté de la vigne et des raisins, n'est en aucun cas préconisé et ne saurait remplacer une gestion optimale des techniques culturales.

Bien que la mesure de N_{ass} ne soit pas une analyse de routine sur moût, nous préconisons d'effectuer un bilan annuel d'azote assimilable à la vendange, en plus du suivi des autres indicateurs de carence azotée (analyse foliaire et indice chlorophyllien). Cela permet de connaître, à long terme, les prédispositions des parcelles à une carence en N_{ass} . De récentes études ont montré l'intérêt d'analyser précocement les teneurs en N_{ass} dans les raisins avant véraison (Nisbet *et al.* 2014; Serrano *et al.* 2010). La prédiction de la teneur finale en N_{ass} à la vendange n'est toutefois pas aisée, car elle varie en fonction de nombreux facteurs biotiques et

abiotiques, notamment les conditions météorologiques pendant la maturation des raisins. Le laboratoire d'analyses des vins d'Agroscope développe actuellement une méthode basée sur la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF), afin de répondre à ce besoin. Cette méthode prometteuse est vouée, dans un proche avenir, à faciliter grandement la gestion de l'azote, tant à la vigne qu'à la cave, et à contribuer ainsi à la qualité organoleptique des vins.

Conclusions

Les bonnes pratiques pour un apport d'urée foliaire efficace sont les suivantes.

- Suivi: réaliser un suivi annuel par parcelle du statut azoté de la vigne et des teneurs en N_{ass} des moûts à la vendange, en vue d'une gestion fine et intégrée des apports d'azote, à la vigne et à la cave.
- Période d'application: autour de la véraison, au début de la phase de maturation des raisins. En début ou fin de journée (température plus faible et hygrométrie plus élevée).
- Quantité: 10 à 20 kg N/ha.
- Fractionnement: 5 kg N/ha par passage, tous les sept à dix jours.
- Mouillage: minimum 300 l/ha. Une bonne dilution facilite l'assimilation de l'azote dans les feuilles.
- Zone d'application: répartition sur l'ensemble du feuillage. ■

Remerciements

Les auteurs remercient Philippe Duruz et René Reymond pour l'entretien des vignes et pour l'application consciencieuse de l'urée. Un grand merci également à Mélanie Huberty (Ecole supérieure d'agriculture à Angers, France) pour sa collaboration et son aide à la synthèse et à l'interprétation des données.

Bibliographie

- Bell S.-J. & Henschke P. A., 2005. Implications of nitrogen nutrition for grapes, fermentation and wine. *Austr. J. Grape Wine Res.* **11**, 242–295.
- Hannam K. D., Neilsen G. H., Neilsen D., Rabie W. S., Midwood A. J. & Millard P., 2013. Late-Season Foliar Urea Applications Can Increase Berry Yeast-Assimilable Nitrogen in Winegrapes (*Vitis vinifera* L.). *Am. J. Enol. Vitic.* **65** (1), 89–95.
- 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. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **42** (3), 125–132.
- Lasá B., Menéndez 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.
- Lorenzini F. & Vuichard F., 2012. Ajout d'acides aminés aux moûts et qualité des vins. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* **44** (2), 96–103.
- Nisbet M. A., Martinson T. E. & Mansfield A. K., 2014. Accumulation and Prediction of Yeast Assimilable Nitrogen in New York Winegrape Cultivars. *Am. J. Enol. Vitic.* doi: 10.5344/ajev.2014.13130

■ Summary

Effect of foliar urea application area on grape nitrogen content

Nowadays, an adequate concentration of yeast assimilable nitrogen (YAN) is recognised as an essential criterion in grape-must composition, both for proper fermentation kinetics and for the final organoleptic profile of the wine. This is particularly true for white-wine vinification with no skin maceration. This paper specifies the context in which an application of foliar urea may be a useful back-up solution for increasing YAN concentration in the must, and restates good practice for successful fertilisation. A trial conducted between 2012 and 2016 showed that it is better to apply foliar urea to the whole canopy rather than targeting a particular leaf area. Monitoring and sustainable management of the nitrogen status of both the vine and grape must would help manage the risks of YAN deficiency in the must.

Key words: Yeast assimilable nitrogen, foliar fertilisation.

■ Zusammenfassung

Einfluss des Behandlungsbereichs von Blattharnstoff auf den Stickstoffgehalt der Weintrauben

Der Gehalt an assimilierbarem Stickstoff gilt heute als wichtiges Merkmal der Zusammensetzung von Traubenmost, sowohl im Hinblick auf den Verlauf des Gärungsprozesses als auch auf das organoleptische Profil des Weines, insbesondere bei der Bereitung von Weissweinen ohne Hülsenmischung. In diesem Artikel wird festgehalten, unter welchen Umständen die Blattharnstoffgabe eine interessante ergänzende Möglichkeit ist, um den Gehalt an assimilierbarem Stickstoff im Most zu erhöhen, und es wird an die gute landwirtschaftliche Praxis für eine erfolgreiche Anwendung dieser Methode erinnert. Ein von 2012 bis 2016 durchgeführter Versuch hat gezeigt, dass es besser ist, den Harnstoff auf das gesamte Blattwerk als nur auf einen bestimmten Bereich anzuwenden. Durch die Beobachtung des Stickstoffzustands der Rebe und des Mosts und geeignete Massnahmen lässt sich das Risiko eines Stickstoffmangels im Most verringern.

■ Riassunto

Impatto della zona di applicazione dell'urea fogliare sul tenore di azoto nell'uva

Il tenore di azoto assimilabile è oggi riconosciuto come un criterio essenziale nella composizione dei mosti di uva, sia per il buon sviluppo della fermentazione sia per il profilo organoleptico finale del vino, in particolare nella vinificazione in bianco senza macerazione pellicolare. Il presente articolo sottolinea in quale contesto un'applicazione di urea fogliata può essere una soluzione di sostegno interessante per aumentare i tenori di azoto assimilabili del mosto e ricorda la buona pratica per l'efficacia di questa applicazione. Uno studio condotto dal 2012 al 2016 dimostra che è meglio applicare l'urea su tutto il fogliaggio piuttosto che su una zona in particolare. Il monitoraggio e la gestione sostenibile dello stato di azoto nella vigna e nel mosto permettono di tenere sotto controllo il rischio di carenza di azoto nel mosto.

- Reynard J. S., Zufferey V., Nicol G. C. & Murisier F., 2011. Soil parameters impact the vine-fruit-wine continuum by altering vine nitrogen status. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 45 (4), 211–221.
- Serrano E., Dias F. & 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 Mondiaiviti, Bordeaux, France, 103–111.
- 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 Vitic. Hortic.* 38 (2), 105–113.
- Spring J.-L., Verdenal T., Zufferey V. & Viret O., 2012. Nitrogen dilution in excessive canopy of Chasselas and Pinot noir cvs. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 46 (3), 233–240.
- 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 Vitic. Arboric. Hortic.* 46 (4), 244–253.
- Spring J. L., Zufferey V., Verdenal T. & Viret O., 2016. Influence du porte-greffe sur le comportement du Pinot noir dans les conditions du Valais central. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 48 (2), 112–122.
- Spring J.-L. & Verdenal T., 2017. Fertilisation en viticulture. Chapitre 12 dans Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse, *Recherche agronomique suisse* (hors-série)
- 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: a15N labelling approach. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 21 (1), 110–117.
- Verdenal T., Zufferey V., Spring J. L., Rösti J., Dienes-Nagy Á., Lorenzini F., Wolfender J. L., Spangenberg J. E., Burgos S., Gindro K. & Viret O., 2016. Complémentation foliaire azotée du cépage *Vitis vinifera* Doral dans le canton de Vaud. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 48 (4), 238–245.
- Zufferey V., Spring J. L., Verdenal T. & Viret O., 2010. Comportement du Pinot noir dans les conditions du vignoble valaisan. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 42 (6), 376–383.