



# La discrimination isotopique du carbone (appelée $\delta^{13}\text{C}$ ) mesurée dans le moût de raisin est un outil accessible pour évaluer l'état hydrique de la vigne dans les conditions de production

Cornelis van Leeuwen<sup>1</sup>, Benjamin Bois<sup>2</sup>, Luca Brillante<sup>3</sup>, Agnès Destrac-Irvine<sup>1</sup>, Mark Gowdy<sup>1</sup>, Damian Martin<sup>4</sup>, Marc Plantevin<sup>1,5</sup>, Laure de Rességuier<sup>1</sup>, Luis G. Santesteban<sup>6</sup>, Vivian Zufferey<sup>7</sup>

<sup>1</sup> EGFV, Univ. Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, ISW, Villenave d'Omon, France

<sup>2</sup> Biogéosciences UMR 6282 CNRS uB, Univ. Bourgogne, 6 Boulevard Gabriel, Dijon, France

<sup>3</sup> Department of viticulture and Enology, California State University Fresno, 2360 E Barstow Ave, Fresno, CA, 93740, USA

<sup>4</sup> The New Zealand Institute for Plant and Food Research Limited, Blenheim 7021, New Zealand

<sup>5</sup> Château La Tour Carnet, 33112 Saint-Laurent/Médoc, France

<sup>6</sup> Department of Agronomy, Biotechnology and Food Science, Public University of Navarra (UPNA), Campus Arrosadia, Pamplona, Spain

<sup>7</sup> Agroscope, Centre de recherches de Pully, CH-1009, Suisse

L'évaluation de l'état hydrique de la vigne est nécessaire pour comprendre l'effet des facteurs environnementaux et des pratiques viticoles sur les vignobles irrigués et non irrigués. Parmi les indicateurs mesurés sur la plante, la discrimination isotopique du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) est facilement accessible, fiable et peu coûteuse. Comme elle fournit une évaluation *a posteriori* de l'état hydrique des vignes pendant la période de maturation des raisins, cette méthode peut être utile pour évaluer l'effet des pratiques viticoles saisonnières. Elle peut également servir à cartographier l'état hydrique du vignoble afin de permettre une gestion de précision de ce dernier à l'avenir. Les possibles applications et limites de cette technique pour la gestion pratique du vignoble sont discutées dans cet article.

## Évaluation de l'état hydrique de la vigne

L'état hydrique de la vigne est un paramètre clé de la production de raisin car il influence à la fois le rendement et la composition des baies. L'état hydrique de la vigne dépend de la disponibilité en eau du sol (qui dépend de la capacité de rétention d'eau du sol), des paramètres climatiques (précipitations et évapotranspiration), du système de conduite de la vigne (surface foliaire par hectare), du matériel végétal (porte-greffe et cépage) et des pratiques viticoles (gestion du sol du vignoble et irrigation).

De nombreuses méthodes d'évaluation de l'état hydrique de la vigne ont été développées et peuvent être regroupées en : (1) mesures basées sur le sol, (2) modélisation du bilan hydrique, et (3) mesures effectuées sur la plante. La précision des approches basées sur le sol et sur la modélisation est limitée par les hypothèses concernant la capacité de rétention d'eau du sol (Réserve Utile ou RU) de la zone racinaire de la vigne, qui dépend fortement de la profondeur d'enracinement et du fonctionnement des racines, paramètres difficilement évaluables sur le terrain. En revanche, les indicateurs mesurés sur la plante intègrent naturellement la RU de la zone racinaire de la vigne et fournissent donc des résultats plus fiables. Parmi les mesures basées sur la plante, le potentiel hydrique par chambre à pression est largement utilisé. La discrimination isotopique du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) mesurée dans le moût de raisin est un autre indicateur de l'état hydrique de la vigne qui présente un fort potentiel d'application dans la gestion du vignoble. Bien que les premiers articles sur cette technique aient été publiés il y a plus de 20 ans<sup>1</sup>, elle n'est toujours pas couramment adoptée par les professionnels.

## Le principe de discrimination isotopique du carbone

Chaque isotope d'un élément possède le même nombre de protons et d'électrons, mais un nombre différent de neutrons, et donc une masse atomique différente. Bien qu'il existe trois isotopes du carbone, seuls le  $^{12}\text{C}$  et le  $^{13}\text{C}$  sont stables dans l'environnement, ce qui les rend utiles pour évaluer la discrimination isotopique dans la nature. Le  $^{12}\text{C}$  est de loin l'isotope de carbone le plus abondant dans la nature, avec une proportion d'environ 99:1 par rapport au  $^{13}\text{C}$ .

Au cours de la photosynthèse, il y a une discrimination en faveur des molécules de  $\text{CO}_2$  contenant des isotopes  $^{12}\text{C}$ , en raison de leur réactivité plus élevée avec les enzymes de la réaction photosynthétique et d'une meilleure diffusion à travers les stomates et le mésophylle. Par conséquent, les rapports  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  dans les sucres produits sont inférieurs à ceux du  $\text{CO}_2$  atmosphérique.

Lorsque les plantes rencontrent un déficit hydrique, ces rapports isotopiques  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  sont encore modifiés car les stomates se ferment et bloquent la diffusion du  $\text{CO}_2$  dans l'espace intercellulaire des feuilles.

**TABLEAU 1.** Valeurs seuils du potentiel foliaire et du  $\delta^{13}\text{C}$  pour interpréter des niveaux de contrainte hydrique. Les seuils des potentiels réfèrent aux valeurs les plus négatives atteintes au cours de la période de maturation.

	$\delta^{13}\text{C}$ dans le moût de raisin (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ dans le vin ou l'eau de vie (‰)	Potentiel foliaire de tige (MPa)	Potentiel foliaire de base (MPa)
Absence de déficit hydrique	< -26	< -27,7	> -0,6	> -0,2
Déficit hydrique faible	-25 to -26	-26,7 to -27,7	-0,6 to -0,9	-0,2 to -0,3
Déficit hydrique modéré	-24 to -25	-25,7 to -26,7	-0,9 to -1,1	-0,3 to -0,5
Déficit hydrique modéré à sévère	-23 to -24	-24,7 to -25,7	-1,1 to -1,4	-0,5 to -0,8
Déficit hydrique sévère	> -23	> -24,7	< -1,4	< -0,8

La concentration relative de  $^{13}\text{CO}_2$  par rapport à celle de  $^{12}\text{CO}_2$  augmente alors dans l'espace intercellulaire et donc dans les sucres produits. Pendant la maturation, ces sucres s'accumulent dans le moût. Le rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  mesuré dans ce moût permet de savoir si les vignes ont été soumises à un déficit hydrique, et le cas échéant d'en déterminer l'intensité<sup>2</sup>.

Le rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  peut être mesuré par spectrométrie de masse isotopique avec une grande précision. Ce rapport est comparé à un étalon dont le rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  est connu ; cette comparaison s'exprime dans une valeur appelée  $\delta^{13}\text{C}$ .

## Classification des niveaux de stress dus au déficit hydrique

Le  $\delta^{13}\text{C}$  mesuré dans les sucres du moût de raisin varie entre -28‰ pour les vignes qui ne sont pas soumises à un déficit hydrique et -20‰ pour les vignes souffrant d'un déficit hydrique sévère. La classification de l'intensité du déficit hydrique dans cette fourchette diffère légèrement d'une publication à l'autre. Les différences dans les seuils de réponse peuvent résulter en partie du fait que les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  sont également influencées par le cépage<sup>3</sup>, et que la variation diurne du potentiel hydrique de tige de la plante peut être significativement différente selon les conditions climatiques au moment de la mesure. Les seuils du Tableau 1 sont calculés à partir de van Leeuwen *et al.*, 2009<sup>2</sup> et Santesteban *et al.*, 2015<sup>4</sup> et s'appliquent aux régions au climat tempéré. Des valeurs seuils plus précises, spécifiques au site et au cépage, peuvent être obtenues localement en combinant les mesures de  $\delta^{13}\text{C}$  et de potentiel hydrique. Une comparaison relative peut également être obtenue : une variation de 1‰ de la valeur de  $\delta^{13}\text{C}$  correspond à une différence de ~0,2 MPa de la valeur du potentiel hydrique de tige mesuré pendant la période de maturation du raisin<sup>5</sup>.



## Mise en œuvre pratique de l'évaluation de l'état hydrique de la vigne avec le $\delta^{13}\text{C}$

La mesure de  $\delta^{13}\text{C}$  est effectuée sur des échantillons de moût de raisin prélevés entre les trois semaines suivant la mi-véraison et la vendange. Les échantillons sont envoyés à un laboratoire équipé d'un spectromètre de masse isotopique. Certains laboratoires estiment la valeur de  $\delta^{13}\text{C}$  à l'aide de la spectroscopie infrarouge avec transformation de Fourier (IRTF), bien que cette méthode ne puisse pas être recommandée en raison de son imprécision. L'une des limites actuelles de la mise en œuvre de la mesure de  $\delta^{13}\text{C}$  est le nombre restreint, mais en constante augmentation, de laboratoires qui proposent l'analyse. Seule une petite quantité de moût (+/- 5  $\mu\text{l}$ ) est nécessaire pour les analyses et peut être obtenue à partir d'échantillons prélevés pour le contrôle régulier de la maturité à la fin de la saison. Ces échantillons doivent toutefois être représentatifs des vignes ou des parcelles de vignes étudiées.

La signature  $\delta^{13}\text{C}$  des sucres du raisin est conservée dans l'éthanol du vin, bien que la fermentation entraîne un décalage de -1,7‰ (Tableau 1<sup>6</sup>). Par conséquent, l'analyse du  $\delta^{13}\text{C}$  peut également être effectuée sur le vin afin de connaître l'état hydrique des vignes qui ont produit le vin étudié<sup>7, 8</sup>.

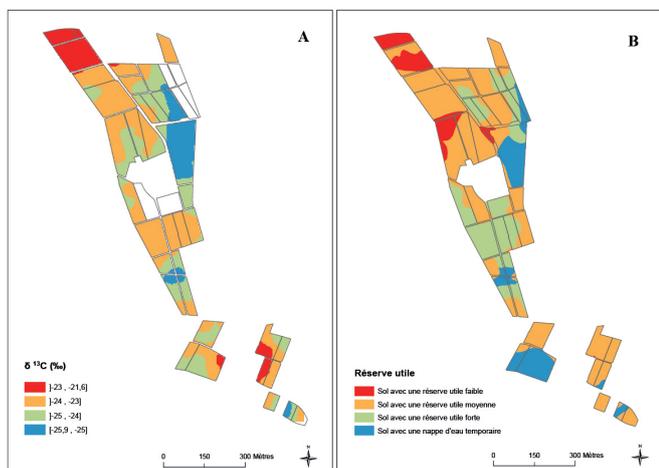
## Applications de l'évaluation de l'état hydrique avec la méthode $\delta^{13}\text{C}$

Le  $\delta^{13}\text{C}$  permet de connaître l'état hydrique de la vigne pendant la période de maturation des baies de raisin, qui commence environ une semaine avant la mi-véraison et se termine trois semaines après la mi-véraison. Cette période correspond, dans la plupart des cas, au mois d'août dans l'hémisphère nord et au mois de février dans l'hémisphère sud, une période clé durant laquelle l'état hydrique de la vigne peut influencer le rendement et le potentiel de qualité du vin.

Le  $\delta^{13}\text{C}$  peut être un outil utile pour évaluer les stratégies d'irrigation à la fin de la saison, l'état hydrique de la vigne étant influencé par la quantité d'eau appliquée et sa répartition au cours de la saison. Afin d'optimiser la qualité du vin rouge, il est souhaitable de cultiver la vigne avec un léger déficit hydrique, avec des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -24‰ et -25‰ indiquant que la vigne n'a pas été trop irriguée. Cette information peut être importante lorsque les raisins sont achetés aux producteurs, car elle fournit un outil pour vérifier la gestion de l'irrigation a posteriori. On peut également utiliser le  $\delta^{13}\text{C}$  pour évaluer facilement l'impact des pratiques de gestion du vignoble (couverts végétaux, travail du sol, effeuillage...) sur l'état hydrique de la vigne.

Vu que le  $\delta^{13}\text{C}$  est un indicateur très accessible (facile à mesurer et peu coûteux), on peut également l'utiliser pour cartographier l'état hydrique de la vigne à l'échelle d'une parcelle de vigne ou d'un domaine viticole (Figure 1A<sup>2</sup>). Le  $\delta^{13}\text{C}$  peut être un outil utile dans les études du terroir des vignobles non irrigués, où l'état hydrique de la vigne dépend largement de la capacité de rétention d'eau du sol (Figure 1B) et du climat, deux paramètres importants du terroir<sup>2, 9</sup>.

Ces cartes de l'état hydrique de la vigne sont très utiles pour affiner le choix du matériel végétal et les stratégies de gestion technique. Dans les zones sèches du domaine, il convient d'utiliser des porte-greffes résistants à la sécheresse afin d'éviter un stress hydrique important.



**FIGURE 1.** A - État hydrique de la vigne mesuré sur un domaine viticole non irrigué à Saint-Émilion (région de Bordeaux, 2022). 172 échantillons ont été prélevés sur les 23 hectares. B - Cartographie de la capacité de rétention en eau du sol établie à partir de la cartographie des sols de la propriété.

Dans les zones humides, la qualité du vin peut être dépréciée par une disponibilité excessive de l'eau et peut être améliorée par la mise en place d'un couvert végétal concurrentiel.

Au niveau intra-parcellaire, la cartographie de l'état hydrique de la vigne à l'aide du  $\delta^{13}\text{C}$  est un outil pour la viticulture de précision, permettant par exemple d'expliquer la variabilité spatiale de la teneur en composés phénoliques du raisin<sup>5</sup>. Mesuré dans le vin (voir les seuils d'interprétation spécifiques, Tableau 1), le  $\delta^{13}\text{C}$  permet de retracer l'état hydrique des vignes qui ont produit le vin. Ceci peut être utilisé pour expliquer l'effet de l'état hydrique de la vigne sur les paramètres liés à la qualité, tels que les arômes<sup>7</sup>.

## Les limites du suivi de l'état hydrique à l'aide du $\delta^{13}\text{C}$

Puisque la mesure de  $\delta^{13}\text{C}$  est effectuée à la fin de la saison, elle ne peut pas être utilisée pour la gestion opérationnelle de l'irrigation au jour le jour. À cet effet, la chambre de pression est recommandée. Une autre limite réside dans le fait que cette mesure représente le déficit hydrique de la vigne pendant la période d'accumulation des sucres dans les baies de raisin. Elle ne permet donc pas d'évaluer les déficits hydriques précoces de la vigne, ni de rendre compte des déficits hydriques survenant après l'accumulation des sucres dans les baies. Il existe également des différences spécifiques aux cépages dans l'efficacité globale de l'utilisation de l'eau qui doivent être prises en compte lors de l'évaluation des réponses de  $\delta^{13}\text{C}$  aux déficits hydriques entre cépages<sup>3</sup>. L'analyse de  $\delta^{13}\text{C}$  n'est actuellement proposée que par un nombre limité de laboratoires commerciaux, mais elle sera davantage disponible au fur et à mesure que la demande augmente.

## Conclusions

Il est essentiel de pouvoir caractériser l'état hydrique de la vigne pour comprendre comment les facteurs environnementaux et les pratiques viticoles peuvent influencer sur le rendement et la qualité du vin. La mesure de  $\delta^{13}\text{C}$  dans le moût de raisin ou le vin est un indicateur facile à mettre en œuvre et peu coûteux de l'état hydrique de la vigne pendant la période de maturation des raisins et peut être utile pour la gestion des vignobles irrigués et non irrigués. ■

**1** Gaudillère, J. P., van Leeuwen, C., & Ollat, N. (2002). Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *Journal of Experimental Botany*, 53(369), 757-763. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.369.757>

**2** van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., & Gaudillère, J. P. (2009). Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes?. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 43(3), 121-134. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.3.798>

**3** Plantevin, M., Gowdy, M., Destrac-Irvine, A., Marguerit, E., Gambetta, G., & van Leeuwen, C. (2022). Using  $\delta^{13}\text{C}$  and hydroscales for discriminating cultivar specific drought responses. *OENO One*, 56(2), 239-250. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5434>

**4** Santesteban, L. G., Miranda, C., Baarbarin, I., & Royo, J. B. (2015). Application of the measurement of the natural abundance of stable isotopes in viticulture: a review. *Australian journal of grape and wine research*, 21(2), 157-167. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12124>

**5** Brillante, L., Martínez-Lüscher, J., Yu, R., & Kurltal, S. K. (2020). Carbon isotope discrimination ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of grape musts is a reliable tool for zoning and the physiological ground-truthing of sensor maps in precision viticulture. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 561477. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.561477>

**6** Gowdy, M., Julliard, S., Frouin, M., Poitou, X., Destrac Irvine, A., & van Leeuwen, C. (2022). Carbon isotope discrimination as an indicator of vine water status is comparable in grape must, wine, and distilled wine spirits. *Frontiers in Food Science and Technology*, 10. <https://doi.org/10.3389/frfst.2022.936745>

**7** Picard, M., Van Leeuwen, C., Guyon, F., Gaillard, L., De Revel, G., & Marchand, S. (2017). Vine water deficit impacts aging bouquet in fine red Bordeaux wine. *Frontiers in chemistry*, 5, 56. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00056>

**8** Martin, D., Grab, F., Grose, C., Stuart, L., Scofield, C., McLachlan, A., & Rutan, T. (2020). Vintage by vine interactions most strongly influence Pinot noir grape composition in New Zealand. *OENO One*, 54(4), 881-902. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.4.4021>

**9** Zufferey, V., Verdenal, T., Dienes, A., Belcher, S., Lorenzini, F., Koestel, C., Blackford, M., Bourdin, G., Gindro, K., Spangenberg, J., Rösti, J., Viret, O., Carlen, C. & Spring, J. L. (2020). The influence of vine water regime on the leaf gas exchange, berry composition and wine quality of Arvine grapes in Switzerland. *OENO One*, 54(3), 553-568. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.3.3106>