

Les outils pour évaluer le stress hydrique et gérer l'irrigation de la vigne – Etat des lieux des avancées scientifiques



Vignes souffrant d'un stress hydrique sévère.

Introduction

Si près de 70% de la surface de la terre est recouverte d'eau, une part de 2,5% seulement est de l'eau douce et uniquement 1% est facilement accessible sous forme liquide, car la majeure partie est emprisonnée dans les calottes glaciaires et les glaciers (Siddique & Bramley 2014). Dans le monde, plus de 330 millions d'hectares de terres agricoles sont irrigués. Cette superficie correspond à environ 20% de la superficie totale des terres agricoles et contribue à 40% de la production de nourriture dans le monde, en raison de la productivité plus élevée des terres irriguées (www.fao.org/nr/water/aquastat/data/glossaire/search.html). Les systèmes de production agricole sous irrigation sont le principal consommateur mondial d'eau douce, qui représente environ 60% des prélèvements d'eau et 80% de la consommation totale d'eau (Siebert *et al.* 2015). En viticulture, l'irrigation était historiquement limitée aux «nouveaux pays viticoles» tels que l'Australie, l'Argentine, les Etats-Unis et le Chili, où une superficie d'environ 580 000 ha est irriguée, ce qui correspond à environ 83% de la surface totale du vignoble. En Argentine, par exemple, environ 250 000 ha – soit

la quasi-totalité de la superficie viticole – sont irrigués. Depuis près de vingt ans, l'irrigation se développe également rapidement dans les zones viticoles européennes traditionnelles.

Dans un monde où l'eau est une ressource rare et où 850 millions de personnes n'ont pas accès à l'eau potable et 2,5 milliards de personnes ne disposent pas d'eau potable à domicile, il est urgent de réduire «l'empreinte hydrique» des cultures irriguées.

Si le réchauffement climatique se poursuit au rythme actuel, les climatologues envisagent une augmentation de la température d'au moins 1,5°C sur la période 2030–2050 (GIEC 2018). De grands changements sont à prévoir notamment dans la distribution des précipitations, l'intensification des vagues de chaleur et de sécheresse ainsi qu'une augmentation des taux d'évapotranspiration de l'eau, conduisant à un bilan hydrique de plus en plus négatif durant le cycle végétatif de la vigne (van Leeuwen & Destrac-Irvine 2017). L'impact du réchauffement climatique sur la physiologie, la phénologie, la composition des baies, la qualité et la typicité des vins fait l'objet de nombreuses études scientifiques (Mira de Orduna 2010; Rienth *et al.* 2014; Rienth *et al.* 2016; Rienth *et al.* 2021; van Leeuwen & Destrac-Irvine 2017). Ces différents aspects ne seront pas développés dans cet article.

Par ailleurs, la consommation en eau de la vigne s'élève entre 300 et 600 mm dans les climats frais et peut atteindre 400 à 800 mm dans les climats chauds durant le cycle végétatif (Williams & Baeza 2007). Cette consommation dépend pour beaucoup de la température saisonnière, mais aussi largement de l'association cépage/porte-greffe, du système de conduite, de la densité de plantation et du rendement, entre autres. Dans la majorité des régions viticoles européennes, les vignes ne sont pas encore irriguées, ce qui pourrait représenter la stratégie la plus durable. Les techniques culturales et agronomiques, propres à atténuer les risques de sécheresse, doivent être envisagées avant de mettre en œuvre l'irrigation.

De telles stratégies consistent à diminuer la consommation en eau par une adaptation de la canopée et de l'entretien des sols, du mode de conduite et de la densité de plantation, mais aussi du choix du cépage et du porte-greffe. Par exemple, la réduction des densités de plantation en combinaison avec un système de conduite à faible surface foliaire, comme le Gobelet, est un moyen efficace pour réduire potentiellement la consom-

mation d'eau. C'est la raison pour laquelle ces systèmes ont été historiquement développés dans les régions sèches du pourtour méditerranéen. Cependant, ces systèmes présentent des inconvénients liés à la difficulté de mécanisation, à de faibles rendements et principalement à des coûts élevés de production qui nuisent au succès économique de la culture. La gestion de l'entretien des sols (couverture herbeuse, paillage, copeaux, etc.) peut contribuer à limiter l'érosion dans certaines situations en absorbant les précipitations estivales, mais aussi à augmenter la consommation d'eau du vignoble lors d'épisodes de fortes chaleurs (enherbement des vignes et concurrence hydrique). Le choix du matériel végétal est un outil très puissant pour adapter les vignobles à la sécheresse, grâce à la combinaison de porte-greffes et de cépages réputés résistants à la sécheresse (van Leeuwen & Destrac-Irvine 2017).

Néanmoins, la fréquence et la gravité de la sécheresse au cours des trois dernières décennies ont nécessité l'installation de systèmes d'irrigation dans de nombreux vignobles du monde pour maintenir une production économiquement durable et assurer la qualité des raisins et des vins. L'évaluation de l'état hydrique de la vigne est devenue un défi important pour adapter les pratiques agronomiques et éventuellement gérer l'irrigation.

Il est bien connu qu'un déficit hydrique modéré améliore la répartition des glucides entre les structures reproductives telles que les baies, et contrôle une végétation excessive. Ce concept a une importance particulière en viticulture, où l'objectif est de garantir une quantité de production économiquement viable, mais aussi une excellente qualité de raisins, déterminée par un équilibre complexe des métabolites primaires et secondaires, qui est atteint avec une contrainte hydrique modérée (Zufferey 2007).

Un déficit hydrique sévère peut cependant entraîner des pertes de quantité et de qualité de la production, tout en menaçant la longévité des souches de vigne en réduisant les réserves des parties pérennes (Pellegrino *et al.* 2014). De surcroît, un déficit hydrique affecte la disponibilité et l'absorption d'azote, réduisant ainsi la synthèse de certains précurseurs de composés aromatiques tels que les thiols et la quantité d'azote fermentescible dans le moût, et entraîne des problèmes de fermentation (Zufferey 2007).

Par conséquent, il s'avère important d'évaluer le plus précisément possible l'état hydrique de la vigne en cours de saison afin d'adapter les pratiques culturales en fonction des objectifs de production. Compte tenu des avancées scientifiques récentes concernant le comportement hydraulique des cépages face au

déficit hydrique, une évaluation des différentes techniques de mesure du régime hydrique reste à établir et à adapter constamment. Le présent article porte sur les techniques d'observation et de mesure de l'état hydrique de la vigne à disposition des viticulteurs à la parcelle.

Méthodes pour évaluer l'état hydrique de la vigne

Le choix des méthodes les plus appropriées pour mesurer l'état hydrique peut être très différent selon l'objectif visé: (a) la gestion pratique d'un vignoble ou d'une parcelle telle que le calendrier d'irrigation, l'évaluation des effets des pratiques culturales ou la compréhension de l'impact de l'état hydrique sur le rendement et la qualité; (b) la compréhension des mécanismes du mouvement de l'eau dans la plante; (c) la compréhension des mécanismes impliqués dans les effets du stress hydrique sur la croissance et la physiologie; ou (d) l'identification des différences de tolérance à la sécheresse pour la création (par croisement) ou la sélection de génotypes tolérants à la sécheresse.

L'observation visuelle

La façon la plus simple d'évaluer l'état hydrique d'une vigne est l'observation visuelle au vignoble. La perte de turgescence des vrilles et le ralentissement de la croissance végétative figurent parmi les premières réponses d'une plante détectant une restriction en eau. Le ralentissement de la croissance végétative est visible en observant l'extrémité des rameaux des vignes ou les apex qui cessent de croître, brunissent et chutent avec le stress hydrique (fig. 1). Une simple méthode consiste donc à observer une cinquantaine d'apex et à les classer selon trois catégories (pleine croissance, croissance ralentie ou arrêt de croissance). Le calcul d'un indice synthétique, appelé indice de croissance des apex (iC-Apex), permet ensuite de caractériser la croissance végétative de la zone observée (Rodríguez-Lovelle *et al.* 2009). Récemment, une application pour Android a été développée pour automatiser ces mesures <https://play.google.com/store/apps/details?id=ag.GB.apex&hl=fr> (Pichon *et al.* 2020). Cependant, l'observation est plus délicate quand la croissance végétative a cessé depuis un certain temps, ou lorsque les apex des rameaux ont été supprimés par cisailage. L'observation de la croissance des entre-cœurs pallie cet inconvénient dans ce cas.

La Chambre à pression: mesure du potentiel hydrique (ψ)

La mesure du potentiel hydrique de la vigne (ψ) représente la tension (c'est-à-dire la pression négative) de la sève brute qui règne à l'intérieur des vaisseaux

conduisant l'eau des racines jusqu'aux feuilles, où elle est vaporisée par transpiration à travers les stomates. Le potentiel hydrique est mesuré dans les tissus du xylème au niveau du pétiole et reflète le potentiel hydrique des feuilles.

Pour assurer le flux de sève brute depuis les racines jusqu'aux feuilles, où a lieu la transpiration, la tension exercée sur la colonne d'eau à l'intérieur des vaisseaux (dans le xylème) augmente progressivement depuis l'interface sol-racine jusqu'aux feuilles. Les valeurs du potentiel hydrique diminuent progressivement de la racine vers les feuilles (elles deviennent plus négatives). Lorsque la tension d'eau dans le xylème devient très élevée à l'interface feuille-air, des bulles d'air se forment à l'intérieur des vaisseaux du xylème: le système hydraulique des pétioles foliaires se déconnectent progressivement de celui des rameaux. Ce phénomène est appelé cavitation et se mesure à travers la perte de conductivité hydraulique des différents organes de la vigne.

L'usage de la chambre à pression s'est largement répandu (fig. 2), non seulement dans les centres de recherche, mais aussi dans de nombreux vignobles européens et américains (Californie, Chili, Argentine, etc.) pour évaluer l'état hydrique de la vigne (Zufferey *et al.* 2019). En Suisse, certains viticulteurs en ont fait l'acquisition également.

Potentiel hydrique des feuilles (ψ_{feuille})

Il est habituellement mesuré à midi solaire, sur des feuilles adultes bien exposées à l'éclairement direct. Les valeurs du ψ_{feuilles} varient cependant en fonction des conditions environnementales, notamment du microclimat lumineux des feuilles, de la température et de l'hygrométrie de l'air durant la journée. Pour ces raisons, le potentiel hydrique des feuilles n'est que rarement utilisé comme indicateur de l'état hydrique de la vigne, car sa représentativité n'est pas toujours garantie.

Potentiel hydrique de tige (ψ_{tige})

Le ψ_{tige} reflète, à un moment donné de la journée, l'état de la disponibilité des ressources en eau du sol (stress édaphique), de la demande atmosphérique (stress climatique) et des capacités de transfert hydraulique (conductivité de la sève brute dans les vaisseaux). Il est mesuré à midi solaire quand la demande climatique est la plus élevée dans des conditions suisses (déficit de pression de vapeur ou VPD au plus haut). Les feuilles sont ensachées dans une poche de papier d'aluminium environ une heure avant la mesure, afin de diminuer au maximum leur transpiration.

Potentiel hydrique de base (ψ_{base})

Le potentiel hydrique de base est mesuré en fin de nuit, juste avant le lever du soleil, sur des feuilles adultes. Il reflète le niveau de réhydratation maximale de la vigne en l'absence de transpiration (à l'obscurité). La mesure du ψ_{base} de la vigne s'équilibre avec le potentiel hydrique du sol, exploré par le système racinaire. Cette mesure renseigne sur la disponibilité de l'eau dans le sol pour la plante (stress édaphique), lorsque les conditions de remplissage de tous les tissus de la plante sont réunies (c'est-à-dire VPD nocturne faible et valeur élevée ou modérée du ratio de transpiration la journée précédente).

Différents seuils de potentiel hydrique ont été proposés pour évaluer l'état hydrique de la vigne au vignoble. Le tableau 1 résume les valeurs correspondantes de potentiels hydrique de base (ψ_{base}), de tige (ψ_{tige}) et de feuille (ψ_{feuille}) en fonction du niveau faible, modéré, fort et sévère du stress hydrique. L'analyse de la composition isotopique du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) est également indiquée.

Interprétation des mesures de potentiel hydrique et phénomène particulier de la cavitation

La mesure du ψ_{base} de la vigne apporte une estimation des ressources en eau du sol et surtout de sa disponibi-



Figure 1 | État de croissance des apex des rameaux de vigne (cv. Chasselas) comme indicateur du stress hydrique. De gauche à droite: Apex en croissance; Ralentissement de la croissance; Arrêt de la croissance avec brunissement de l'apex; Chute de l'apex.



Figure 2 | Utilisation de la bombe Scholander dans différents vignobles. (Photo Hernan Ojeda)

lité. Néanmoins, durant la nuit, la transpiration de la vigne n'est pas tout à fait nulle, mais subsiste de façon très faible. Selon les conditions du milieu, l'équilibre entre le potentiel matriciel de l'eau du sol et celui de la plante n'est pas toujours atteint. Aussi, dans les cas où plusieurs jours à forte demande évaporative se suivent, l'hypothèse du remplissage en eau de tous les tissus pourrait ne plus être à 100% vraie. Le potentiel foliaire de base demeure une bonne estimation de l'état hydrique instantané de la plante, mais il n'est plus une bonne estimation des disponibilités en eau du sol. Ce phénomène est particulièrement connu dans les régions désertiques, notamment quand le déficit de pression de vapeur est élevé durant la nuit. Dans le vignoble suisse, ces conditions sont très rarement atteintes, et on peut considérer que la mesure du ψ_{base} est une bonne estimation de l'état hydrique de la vigne et des disponibilités en eau du sol.

Quand les conditions climatiques deviennent extrêmes, comme lors d'une sécheresse et d'une canicule prolongée et/ou de fortes demandes atmosphériques (VPD – déficit de pression de vapeur – très élevé), les mesures de potentiel hydrique au niveau du pétiole foliaire (ψ_{feuille}) ne reflètent pas toujours l'état hydrique des rameaux (ψ_{tige}) en fonction de leur conductivité hydraulique respective (Charrier *et al.* 2016, cité par Rienth M. & Scholasch T. 2019). L'embolisation ou la cavitation des vaisseaux du limbe foliaire et des pétioles (formation de bulles d'air) entraîne une perte de conductivité hydraulique et une chute de la transpiration foliaire. Les feuilles sont alors déconnectées des rameaux et agissent comme des fusibles hydrauliques (Zufferey *et al.* 2011), en limitant fortement la transpiration et la propagation de l'embolie, tout en préservant l'intégrité des autres organes (rameaux, raisins, etc.) sous stress hydrique. Les pétioles foliaires semblent plus vulnérables aux accidents physiologiques comme l'embolie que les rameaux (Charrier *et al.* 2016). Certains cépages semblent capables de développer une segmentation hydraulique efficace, pour laquelle les pétioles de feuilles jouent un rôle important. Dans les circonstances exceptionnelles d'embolie, la mesure des potentiels hydriques ne traduit pas tou-

jours l'état réel d'alimentation en eau de la plante. Des travaux récents (Dayer *et al.* 2020) suggèrent d'identifier les caractéristiques ou les traits de résistance à la sécheresse, spécifiques à chaque cépage. Ces approches innovantes permettraient d'évaluer de façon plus globale les spécificités de la tolérance de la vigne à la sécheresse (Gambetta *et al.* 2020).

Méthode de discrimination à partir des isotopes du carbone

La mesure de la discrimination isotopique du carbone ($\delta^{13}\text{C}$ ou rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) se fonde sur l'analyse de la composition isotopique du carbone dans les sucres d'organes végétatifs, de baies ou des moûts de raisins. Une bonne corrélation a été démontrée entre la composition isotopique du carbone des moûts de raisins et les valeurs de potentiels hydriques foliaires obtenus au cours de la même saison (Rienth *et al.* 2020). La mesure est généralement réalisée à la fin de la saison et n'est donc pas adaptée pour gérer l'irrigation quotidienne ou les pratiques culturales pendant la saison. Cependant, la mesure peut être utile pour évaluer a posteriori l'effet des pratiques culturales, de l'irrigation et des conditions du millésime sur l'assimilation du carbone et des sucres qui est liée aux déficits en eau. Pour la caractérisation des terroirs (cartographie spatiale des risques de sécheresse au vignoble à long terme), cette approche a montré sa pertinence.

Mesure basée sur le flux de sève

Le flux de sève est le mouvement de l'eau à l'intérieur du xylème depuis les racines aux feuilles, où elle est transpirée à travers les stomates. Le flux de sève mesure directement la quantité d'eau utilisée au niveau de la vigne entière. Il existe deux méthodes de mesure.

1) Méthode de dissipation thermique

Cette méthode utilise des sondes insérées sous forme d'aiguilles dans la vigne. Vergeynst *et al.* (2014) ont montré que la variation circonférentielle et radiale de la densité du flux de sève peut entraîner à la fois une sous-estimation et une surestimation du flux de sève. De plus, la densité du flux de sève peut être sous-estimée



	ψ_{base} (MPa)	ψ_{tige} (MPa)	ψ_{feuille} (MPa)	$\delta^{13}\text{C}$ (pour mille)
Aucun stress	> -0,2	> -0,6	> -0,9	< -26
Stress faible	-0,2 à -0,3	> -0,6 à -0,9	-0,9 à -1,1	-24,5 à -26
Stress modéré	-0,3 à -0,5	-0,9 à -1,1	-1,1 à -1,3	-23 à -24,5
Stress modéré à fort	-0,5 à -0,8	-1,1 à -1,4	-1,3 à -1,4	-21,5 à -23
Stress sévère	< -0,8/0,9	< -1,4	< -1,4	-21,5

Tableau 1 | Valeurs du potentiel hydrique et de $\delta^{13}\text{C}$ pour apprécier l'état hydrique de la vigne d'après Carbonneau 1998; Lovisolo *et al.* 2016; van Leeuwen *et al.* 2009; Zufferey 2007.

lorsque l'aiguille chauffée est en contact avec des tissus non conducteurs. Par conséquent, la méthode de dissipation thermique n'est pas utilisée pour une application au niveau industriel.

2) Méthode de l'équilibre thermique de la tige

La conception du capteur de flux de sève se compose d'un manchon chauffant enroulé autour de la tige. La chaleur est fournie uniformément et radialement à travers la section de la tige; le manchon est flexible et maintient un ajustement serré entre la tige et le thermocouple pendant les contractions diurnes de la tige (fig. 3). Les capteurs peuvent être appliqués sur des tiges légèrement pliées ou même lorsqu'elles sont partiellement nécrotiques, comme cela est parfois observé en réponse à des plaies de taille ou des maladies du bois. Parce que toute la section de la tige est chauffée, la méthode du bilan thermique peut être appliquée, même si la trajectoire du flux de sève à travers la tige est tortueuse. Les résultats montrent que le bilan thermique de la tige est une méthode fiable pour calculer l'utilisation de l'eau de la vigne (c'est-à-dire la transpiration) séparément des autres composantes de l'évapotranspiration (ET), telles que l'évaporation du sol ou la transpiration des cultures de couverture dans l'inter rangs. Pour ces raisons, des capteurs de flux de sève non intrusifs ont été adoptés en pratique avec succès pour conduire les stratégies d'irrigation. La figure 4 illustre comment les grands volumes d'irrigation par rapport aux petits affectent la réponse du flux de sève dans un même vignoble.

Méthodes basées sur le sol

Les études basées sur le sol évaluent directement l'humidité du sol soit par des méthodes volumétriques

(pourcentage d'eau dans un volume donné de sol), soit par des méthodes tensiométriques (force physique retenant l'eau dans le sol). Il existe une multitude de types de capteurs et de fournisseurs proposant différents systèmes. Certains appareils mesurent directement la tension d'eau dans le sol. Cependant, la majorité des instruments utilisent des systèmes de mesure indirects via des courants électriques. Parmi les instruments les plus couramment utilisés, il faut signaler les tensiomètres et les psychromètres du sol, qui mesurent la tension capillaire ou l'énergie avec laquelle l'eau est retenue par les particules du sol (Mullins 2001). Les sondes à neutrons ou les capteurs capacitifs (Townend *et al.* 2001) sont des exemples de systèmes de mesure volumétrique fréquemment utilisés au champ.

La surveillance continue et automatisée de l'humidité du sol constitue le principal avantage des capteurs placés directement dans le sol. La mesure de la teneur en eau du sol durant l'hiver et la possibilité d'évaluer le niveau de remplissage de leur réserve utile présentent également un intérêt, notamment sous climats secs. Ces capteurs installés en permanence sont largement utilisés pour la surveillance de l'irrigation des cultures annuelles sur des sols peu profonds et homogènes ainsi que dans les serres.

Cependant, dans le contexte spécifique de la viticulture, l'utilisation de capteurs d'humidité du sol présente plusieurs inconvénients. Dans le vignoble, en effet, les sols sont souvent pierreux et hétérogènes. L'utilisation de capteurs est très délicate, voire impossible dans ce cas. La cartographie des sols permet de mettre en évidence l'hétérogénéité des parcelles et devrait servir à mieux définir l'emplacement des capteurs. Cependant, le morcellement et l'hétérogénéité des parcelles sur de petites distances néces-



Figure 3 | Capteur de flux de sève.

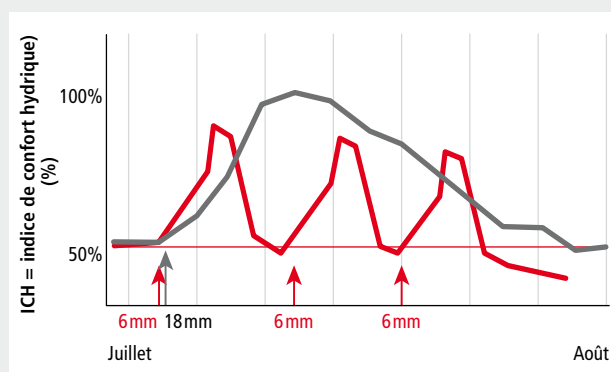


Figure 4 | Profil montrant l'indice de confort hydrique (ICH) calculé à partir du ratio entre transpiration réelle et évapotranspiration de référence. Ce qui distingue les deux profils sont les irrigations indiquées par les flèches pour leur moment d'application et leurs volumes respectifs (d'après Scholasch 2018).

sitent un nombre élevé de capteurs et un investissement financier important. La présence de cailloux rend leur installation très difficile, notamment dans les couches plus profondes du sol où se trouvent les racines.

Par ailleurs, les capteurs au sol nécessitent un entretien régulier et ont souvent une durée de vie assez limitée, en particulier en viticulture, où les passages fréquents avec de la machinerie lourde pour les opérations de travail du sol, la tonte et d'autres interventions liées au sol augmentent le risque de dommages pour des capteurs souvent fragiles.

Enfin, l'enracinement profond de la vigne, qui dépend entre autres du type de sol et du porte-greffe, limite les possibilités d'estimation de l'eau disponible dans le sol, mesurée par le capteur, et celle à disposition pour la vigne. Cette faiblesse est réelle dans les situations où la vigne a accès à de l'eau provenant des couches de sol plus profondes, qui ne sont pas nécessairement mesurées par le capteur.

Méthodes de bilan hydrique

En complément des méthodes décrites précédemment, on peut utiliser des méthodes de modélisation de la contrainte hydrique. Les calculs du bilan hydrique du sol sont un moyen indirect pour évaluer l'état hydrique de la vigne et peuvent servir à piloter l'irrigation. La quantité totale d'eau du sol et sa fraction qui est transpirée potentiellement par la plante sont estimées en utilisant une approche de modélisation. La variation de l'humidité du sol durant la saison est estimée à partir des entrées (irrigation et précipitations) et des pertes d'eau (ruissellement, drainage et évapotranspiration) (Lebon *et al.* 2003). La quantité totale d'eau transpirable est la quantité d'eau du sol non disponible au point de flétrissement déduite de la capacité maximale de rétention d'eau du sol, qui dépend de la profondeur d'enracinement efficace et de la composition du sol. La quantité totale d'eau du sol transpirable indique le point de départ du modèle quand le sol est à pleine capacité. Le modèle effectue une mise à jour quotidienne de la teneur en eau du sol pour laquelle la quantité d'eau transpirable qui demeure dans le sol (TSW_d) est calculée selon la formule suivante à la date «d»:

$$TSW_d = TSW_{d-1} + Rain_d + I_d - Runoff_d - ES_d - Tcrop_d$$

où TSW_d = une estimation de l'eau totale disponible à la date d, R = pluie, I = irrigation, ES = évapotranspiration du sol (avec ou sans couverture herbeuse), et Tcrop = transpiration à partir de la canopée de la vigne.

Ces modèles permettent de suivre l'évolution de l'eau dans le sol, disponible pour la vigne en cours de saison, et aident à piloter l'irrigation.

Conclusions

De nombreux indicateurs physiologiques de l'état hydrique de la vigne peuvent être utilisés au vignoble, comme des outils d'aide à la décision pour l'irrigation, mais aussi pour adapter les pratiques culturales à plus long terme (entretien des sols, choix des porte-greffes, gestion de la canopée, etc.). Parmi ces indicateurs figurent l'observation de la croissance des rameaux, la mesure des potentiels hydriques, des flux de sève, de la composition isotopique du carbone dans les sucres, ou encore l'utilisation de modèles de bilan hydrique.

Chaque indicateur présente des avantages et parfois des inconvénients dans la caractérisation du régime hydrique de la vigne, qu'il faut évaluer en fonction de chaque situation (précision de la mesure, fiabilité et facilité d'utilisation, etc.) et des objectifs recherchés (irrigation, cartographie des terroirs, prédiction, etc.).

De nos jours, la mesure des potentiels hydriques foliaires et particulièrement du potentiel hydrique de base (ψ base) et de tige (ψ tige) constitue une référence universelle pour évaluer le statut hydrique des végétaux et de la vigne en particulier. Les récents travaux de recherche suggèrent néanmoins que ces indicateurs doivent être complétés dans certaines situations particulières (fortes chaleurs, déficit hydrique extrême, VPD élevés) par des études complémentaires touchant au fonctionnement hydraulique des vignes. Des accidents physiologiques comme l'embolie des vaisseaux entraînent des dysfonctionnements de la conductivité de la sève brute dans les rameaux de vigne et une évaluation plus délicate de leur statut hydrique. Le réchauffement climatique et les situations de sécheresse périodique risquent de renforcer ces phénomènes à l'avenir.

Une irrigation raisonnée et économe en eau doit pouvoir intégrer des indicateurs physiologiques fiables afin de diminuer les intrants. ■

Les auteurs

Markus Rienth, Changins, route de Duillier 50, 1260 Nyon, Suisse
Thibaut Scholasch, Fruition Sciences, MIBI, rue du Mas-de-Verchant 672, 34000 Montpellier, France, <https://fruitionsciences.com>
Vivian Zufferey, Agroscope, Centre de recherche viticole, 1009 Pully, Suisse
Renseignements: Markus Rienth, tél. +41 22 363 40 61, e-mail markus.rienth@changins.ch, www.changins.ch



Bibliographie

- Carbonneau A. (1998). Irrigation, vignoble et produit de la vigne. Aspects qualitatifs. In T. e. D. Lavoisier (Ed.), *Traité d'irrigation*, Tiercelin JR, pp. 258–276.
- Charrier G., Torres-Ruiz J. M., Badel E., Burlett R., Choat B., Cochard H., Delmas C. E. L., Domec J.-C., Jansen S., King A., Lenoir N., Martin-StPaul N., Gambetta G. A. & Delzon S. (2016). Evidence for hydraulic vulnerability segmentation and lack of xylem refilling under tension. *Plant Physiol* **172** (3), 1657–1668. Doi: 10.1104/pp.16.01079.
- Dayer S., Herrera J. C., Dai Z., Burlett R., Lamarque L. J., Delzon S., Bortolami G., Cochard H. & Gambetta G. A. (2020). The sequence and thresholds of leaf hydraulic traits underlying grapevine varietal differences in drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*. Doi:10.1093/jxb/eraa186
- Gambetta G. A., Herrera J. C., Dayer S., Feng Q., Hochberg U. & Castellarin S. D. (2020). Grapevine drought stress physiology: towards an integrative definition of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*. Doi: 10.1093/jxb/eraa245.
- Hannah L., Roehrdanz P. R., Ikegami M., Shepard A. V., Shaw M. R., Tabor G., Zhi L., Marquet P. A. & Hijmans R. J. (2013). Climate change, wine and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Doi: 10.1073/pnas.1210127110.
- Lebon E., Dumas V., Pieri P. & Schultz H. R. (2003). Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology* **30** (6), 699–710. Doi: <https://doi.org/10.1071/FP02222>.
- Lovisolo C., Lavoie-Lamoureux A., Tramontini S. & Ferrandino A. (2016). Grapevine adaptations to water stress: new perspectives about soil/plant interactions. *Theoretical Experimental Plant Physiology* **28** (1), 53–66. Doi: 10.1007/s40626-016-0057-7.
- Mira de Orduna R. (2010). Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International* **43** (7), 1844–1855.
- Pichon L., Brunel G., Payan J.-C. & Tisseyre B. (2020). Apex-Vigne: Une application mobile pour faciliter le suivi de la croissance et estimer l'état hydrique des parcelles viticoles. *IVES, Technical Reviews*. Doi: <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2020.3558>.
- Rienth M. (2020). Une étude de terroirs à Villette (Lavaux, VD). *Revue suisse viticulture, arboriculture et horticulture* **52** (6), 320–334.
- Rienth M. & Scholasch, T. (2019). State of the Art of tools and methods to asses vine water status. *OENO One* **53** (4).
- Rienth M., Torregrosa L., Luchaire N., Chatbanyong R., Lecourieux D., Kelly M. & Romieu C. (2014). Day and night heat stress trigger different transcriptomic responses in green and ripening grapevine (*vitis vinifera*) fruit. *BMC Plant Biology* **14** (1), 108.
- Rienth M., Torregrosa L., Sarah G., Ardisson M., Brillouet J.-M. & Romieu C. (2016). Temperature desynchronizes sugar and organic acid metabolism in ripening grapevine fruits and remodels their transcriptome. *BMC Plant Biology* **16** (1), 164. Doi: 10.1186/s12870-016-0850-0.
- Rienth M., Vigneron N., Darriet P., Sweetman C., Burbidge C., Bonghi C., Walker, R. P., Famiani F. & Castellarin S. D. (2021). Grape berry secondary metabolites and their modulation by abiotic factors in a climate change scenario – a review. *Frontiers in Plant Science*. Doi: 10.3389/fpls.2021.643258.
- Rodriguez-Lovelle B., Trambouze W. & Jacquet O. (2009). Progrès agricole et viticole, évaluation de l'état de croissance végétative de la vigne par la « méthode des apex ». (126), 77–88.
- Scholasch T. & Rienth M. (2019). Review of water deficit mediated changes in vine and berry physiology; consequences for the optimization of irrigation strategies. *OENO One* **53** (3). Doi: <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.3.2407>.
- Scholasch T. (2018). Improving winegrowing with sap flow driven irrigation – a 10-year review. *Acta Hort.*, 1222, 155–168. Doi: 10.17660/ActaHortic.2018.1222.21.
- Siddique K. & Bramley H. (2014). Water deficits: Development. In Y. Wang (Ed.), *Encyclopedia of Natural Resources*, vol. 1, pp. 1–4. New York, USA: CRC Press. <https://doi.org/10.1081/E-ENRL-120049220>
- Siebert S., Kumm M., Porkka M., Döll P., Ramankutty N. & Scanlon B. R. (2015). A global data set of the extent of irrigated land from 1900 to 2005. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **19** (3), 1521–1545. Doi: 10.5194/hess-19-1521-2015.
- van Leeuwen C. & Destrac-Irvine A. (2017). Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One* **51**, 147–154.
- van Leeuwen C., Tregoat O., Chone 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? *J Int Sci Vigne Vin* **43**, 121–134.
- Williams L. E. & Baeza P. (2007). Relationships among ambient temperature and vapor pressure deficit and leaf and stem water potentials of fully irrigated, field-grown grapevines. *Amer J Enol Vitic* **58** (2), 173–181.
- Zufferey V. (2007). Alimentation en eau et irrigation de la vigne. *Revue suisse viticulture, arboriculture, horticulture* **39**, 77–78.
- Zufferey V., Cochard H., Ameglio T., Spring J.-L. & Viret O. (2011). Diurnal cycles of embolism formation and repair in petioles of grapevine (*Vitis vinifera* cv. Chasselas). *Journal of Experimental Botany* **62** (11), 3885–3894.
- Zufferey V., Verdenal T. & Spring J. L. (2019). Indicateurs du statut hydrique de la vigne. *Revue suisse viticulture, arboriculture, horticulture* **51**(3), 190–195.