

Selon Williams & Baeza (2007) au cours de son cycle végétatif la vigne consomme entre 300 et 600 mm d'eau en climats frais, tandis qu'en climats chauds elle peut atteindre entre 400 et 800 mm.

Cependant en raison de l'augmentation de la fréquence des sécheresses au cours des trois dernières décennies, de nombreux vignobles à travers le monde ont été contraints de mettre en place des systèmes d'irrigation afin de garantir une production économiquement viable et préserver la qualité des raisins et des vins.

Ainsi, l'évaluation de l'état hydrique de la vigne est devenue un enjeu majeur pour ajuster les pratiques agronomiques et gérer éventuellement l'irrigation de manière appropriée.

L'application d'un déficit hydrique modéré en viticulture favorise une production économiquement viable et une meilleure qualité des raisins grâce à une amélioration de la répartition des glucides entre les baies, un contrôle de la croissance excessive des vignes et un meilleur équilibre des métabolites primaires et secondaires (Zufferey, 2007).

A l'inverse un déficit hydrique sévère peut entraîner des pertes importantes en termes de quantité et de qualité de production de raisins.

Ainsi, il devient essentiel d'évaluer de manière précise l'état hydrique de la vigne pendant la saison pour pouvoir ajuster les pratiques culturales avec les objectifs de production.

Nous vous présentons ici différentes méthodes qui sont utilisées pour évaluer le statut hydrique de la vigne.

Besoins en eau de la vigne

L'eau est le facteur le plus influent sur la composition des baies de raisin (Van Leeuwen et al., 2009) et ses besoins en eau sont évalués à environ 250 litres pour produire 1 kg de raisin (Ojeda et Saurin, 2014) donc pour produire 50 hl/ha il faut environ 200 mm d'eau pour tout le cycle de production (un rendement de 50 hl/ha correspond à une production d'environ 8000 kg/ha de raisin soit 2000 m³/ha d'eau).

Les besoins hydriques de la vigne varient en fonction de deux paramètres essentiels que sont le cycle végétatif et le type de vin produit (figure 1).

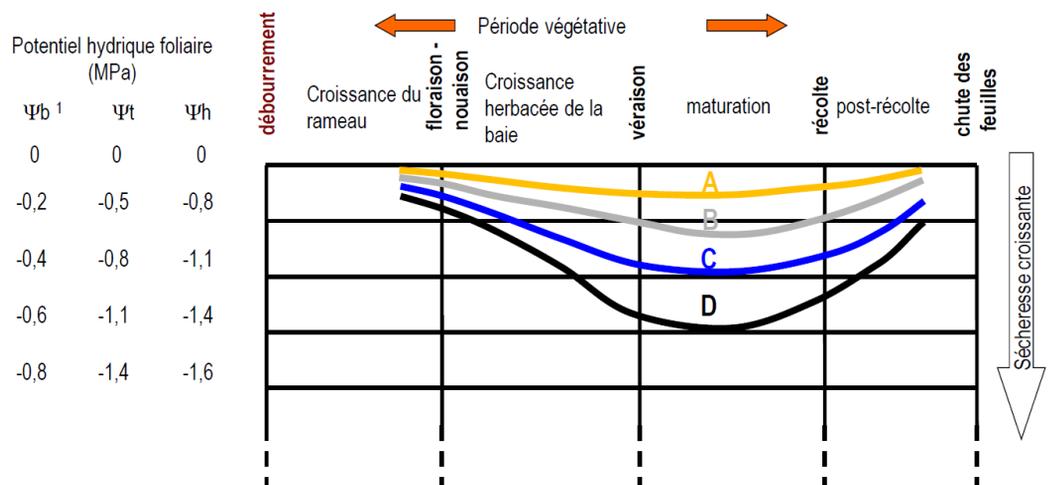


Figure 1 : différentes stratégies d'irrigation possibles pour contrôler l'état hydrique du vignoble en fonction de la période végétative et du type de produit recherché (Ojeda & Saurin, 2014).

- (A) moûts concentrés, jus de raisin, vins de table et jeunes vignobles en formation.

- (B) vins blancs, vins rouges légers, fruités.

- (C) vins jeunes de qualité, équilibrés mais avec prédominance du fruit sur la structure, seuils limites pour les vins blancs.

- (D) vins de qualité, concentrés, équilibrés et aptes pour le vieillissement.

¹potentiel hydrique de base (ψ_b), potentiel de tige au zénith (ψ_t), potentiel de feuille au zénith (ψ_f)

Le cycle végétatif

La vigne nécessite une quantité d'eau suffisante depuis le débournement jusqu'à la floraison pour favoriser la croissance des rameaux.

De la floraison jusqu'à la véraison on recherche progressivement une légère contrainte hydrique afin de permettre la croissance des baies sans les agrandir excessivement et ainsi préserver leur qualité.

À maturation, une contrainte hydrique plus marquée est nécessaire pour concentrer les composés aromatiques et phénoliques dans les baies.

Après les vendanges il est souhaitable de réduire cette contrainte pour que la plante puisse reconstituer ses réserves de nutriments en vue de l'année suivante (Zufferey et al., 2020).

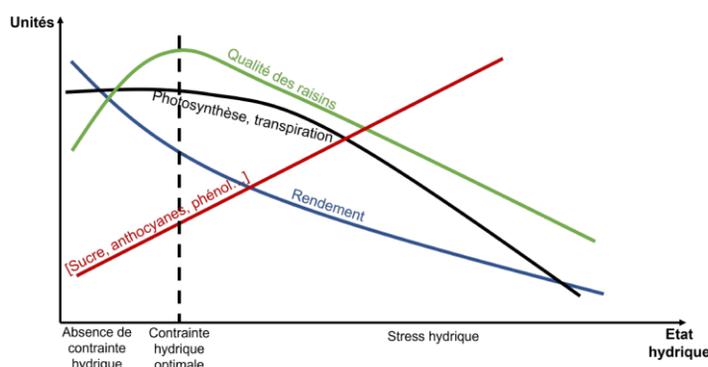
Le type de vin produit

La contrainte hydrique recherchée ne sera pas la même par exemple entre un vin rouge corsé ou un vin rosé puisque la concentration recherchée en composés phénoliques sera différente (Ojeda et Saurin, 2014).

Impact de la contrainte hydrique sur la physiologie de la vigne

La contrainte hydrique optimale est celle qui favorise une qualité maximale des raisins tout en ayant peu d'impact sur le rendement.

L'impact du statut hydrique de la vigne sur son fonctionnement général est illustré dans la figure 2 ci-dessous.



Une restriction en eau a une influence significative sur de nombreux processus physiologiques tels que la croissance des rameaux et des baies, la photosynthèse et la maturation (Bernard et al., 2004).

Le tableau 1 récapitule l'impact de l'intensité de la contrainte hydrique sur la physiologie de la vigne.

Figure 2 : impact du statut hydrique de la vigne sur son fonctionnement (Laroche, 2021)

Niveau de contrainte	Potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) (bars)	Croissance végétative	Photosynthèse foliaire	Croissance des baies	Maturation des raisins
Faible	0 à -3,0	normale	normale	normale	normale
Modéré	-3,0 à -5,0	réduite	légèrement réduite	réduite	optimale
Fort	-5,0 à -9,0	inhibée	réduite/inhibée	réduite/inhibée	réduite/inhibée
Sévère	< à -9,0	inhibée	inhibée	inhibée	inhibée

Tableau 1 : niveaux de contrainte hydrique et conséquences sur la physiologie de la vigne.

Une contrainte hydrique trop élevée (stress hydrique) peut se traduire par une baisse des rendements, une diminution de la qualité de la vendange (Van Leeuwen et al., 2003) et mettre en difficulté la pérennité des souches de vigne en épuisant les réserves des parties pérennes (Pellegrino et al., 2014).

Le stress hydrique perturbe également la disponibilité et l'absorption de l'azote ce qui diminue la quantité d'azote fermentescible dans le moût entraînant des problèmes de fermentation ainsi que la synthèse de certains précurseurs aromatiques comme les thiols (Zufferey, 2007).

Par ailleurs, l'augmentation des températures et la diminution des précipitations entraînent des stades de développement plus précoces pour la vigne (Quenol et al., 2017) décalant ainsi la phase de maturation vers des périodes encore plus chaudes (Van Leeuwen et Darriet, 2016).

Ceci a pour conséquence de modifier la composition des baies en augmentant leur concentration en sucre et donc d'accroître le degré alcoolique des vins produits (Bernardo et al., 2018).

Méthodes de mesure du statut hydrique

1. Méthodes de mesure du statut hydrique de la vigne

La méthode des APEX

Parmi les premiers symptômes d'une vigne soumise à une restriction en eau, on observe la perte de turgescence des vrilles et le ralentissement de la croissance végétative.

Ce ralentissement de croissance est visible en observant les apex qui cessent de croître puis brunissent et enfin chutent avec l'intensité du stress hydrique.

La « méthode des apex » (Rodriguez-Lovelle et al., 2009) est une méthode simple d'évaluation de l'état hydrique d'une vigne qui consiste à observer une cinquantaine d'apex par parcelle et à les classer selon trois catégories (figure 3) : croissance active, croissance ralentie ou arrêt de croissance.

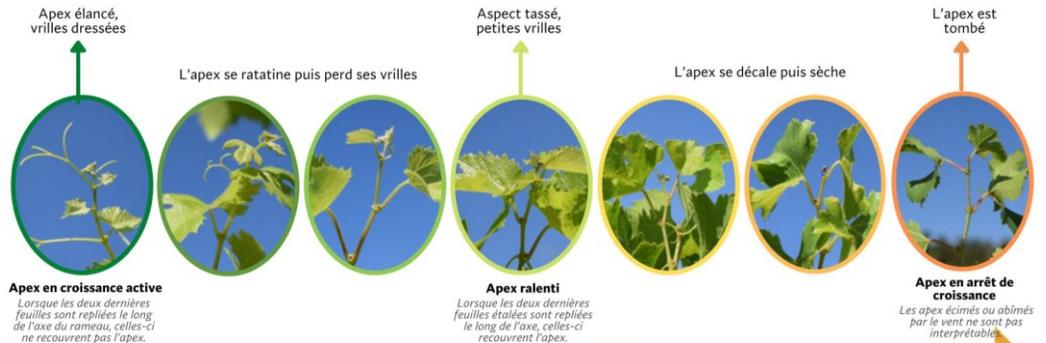


Figure 3 : clé de détermination de l'état de croissance de l'apex (Institut Rhodanien).

Puis on calcule l'indice de croissance des apex (iC-Apex) grâce à la formule suivante :

$$iC\text{-Apex} = \% \text{ Apex poussants} + (\% \text{ Apex ralentis} * 0,5)$$

Une clé d'interprétation est donnée en figure 4.

4 à 5 mesures sont nécessaires pour interpréter la dynamique de croissance, la 1ère étant 10 jours après floraison puis par la suite environ tous les 10 jours.

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&q=US> (Pichon et al., 2020).

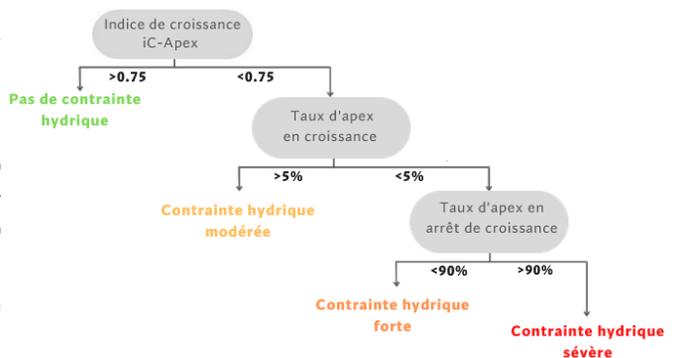


Figure 4 : clé d'interprétation de l'indice de croissance des apex iC-Apex (Institut Rhodanien).

Toutefois, l'observation devient plus difficile lorsque la croissance végétative s'est arrêtée depuis un certain temps ou que les apex des rameaux ont été supprimés par rognage.

Dans ce cas, l'observation de la croissance des entrecoeurs permet de remédier à cet inconvénient.

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

La méthode couramment utilisée pour évaluer l'état hydrique d'une feuille de vigne est la mesure du potentiel hydrique à l'aide d'une chambre à pression : c'est la méthode de référence actuelle pour évaluer l'état hydrique de la plante.

Pour garantir une surveillance rigoureuse, il est recommandé de réaliser au moins trois relevés par placette.

Le potentiel hydrique de la vigne (Ψ) est une indication de la tension (ou pression négative) présente dans la sève brute qui circule à l'intérieur des vaisseaux du xylème.

Cette tension permet le transport de l'eau depuis les racines jusqu'aux feuilles où elle sera ensuite évaporée par transpiration à travers les stomates des feuilles.

Le potentiel hydrique est mesuré au niveau du pétiole des feuilles dans les tissus du xylème et il représente le potentiel hydrique des feuilles.

Méthodes de mesure du statut hydrique de la vigne

Le potentiel hydrique permet donc d'évaluer la force de rétention de l'eau dans les feuilles : plus les valeurs mesurées sont négatives et plus la rétention en eau à l'intérieur de la plante est importante traduisant ainsi une contrainte hydrique élevée.

En effet, le flux de sève brute depuis les racines jusqu'aux feuilles (où se produit la transpiration) est assuré par une tension croissante exercée sur la colonne d'eau à l'intérieur des vaisseaux du xylème (Rienth et Scholasch, 2021). Ainsi, les valeurs du potentiel hydrique diminuent progressivement de la racine vers les feuilles devenant de plus en plus négatives à mesure que l'on se rapproche des feuilles.

Lorsque la tension d'eau dans le xylème atteint un niveau élevé à l'interface feuille/air (contrainte hydrique très forte), des bulles d'air se forment à l'intérieur des vaisseaux du xylème provoquant une déconnexion progressive du système hydraulique entre les pétioles foliaires et les rameaux (Rienth et Scholasch, 2021).

Ce phénomène connu sous le nom de cavitation peut être évalué par la perte de conductivité hydraulique des différents organes de la vigne (Charrier et al., 2016 ; Hochberg et al., 2017).

Les courbes de vulnérabilité du xylème (figure 5) indiquent que la diminution du potentiel hydrique du xylème entraîne une augmentation de la déconnexion hydraulique entre le pétiole et le rameau.

Par exemple, lorsque le potentiel hydrique du xylème est proche de -1 MPa (\approx -10 bars) au niveau du pétiole, seulement 50 % des vaisseaux du xylème restent remplis d'eau (figure 5) : cette déconnexion progressive entre les feuilles et le rameau fait de la feuille un « fusible hydraulique » qui empêche la propagation de la cavitation vers le rameau.

Comme nous venons de le voir, l'évaluation du potentiel hydrique des feuilles est une méthode utile pour estimer le niveau de stress hydrique ressenti par les feuilles.

Cependant, en raison de la cavitation qui entraîne une segmentation hydraulique entre les rameaux et les feuilles (figure 5), l'état hydrique des feuilles n'est pas forcément en équilibre avec celui des autres organes de la vigne.

Ainsi il est difficile d'établir systématiquement un lien direct entre le potentiel hydrique et les besoins en irrigation ressentis par l'ensemble des organes de la plante (Scholasch et Rienth, 2020).

Malgré la limite physiologique du potentiel hydrique des feuilles pour estimer les besoins en eau de l'ensemble de la plante, la mesure en chambre à pression (photo 1) reste très utilisée en raison de sa simplicité (Scholasch et Rienth, 2020).

Cette méthode s'est largement répandue dans les centres de recherche ainsi que dans de nombreux vignobles européens et américains (Californie, Chili, Argentine) pour évaluer l'état hydrique de la vigne (Zufferey et al., 2019).

Le principe de la mesure en chambre à pression consiste à appliquer une pression avec un gaz neutre (généralement de l'azote) sur le pétiole d'une feuille afin d'évaluer la capacité de ses cellules à retenir l'eau.

En insérant la feuille dans la chambre et en augmentant la pression jusqu'à ce qu'une goutte de sève perle du pétiole, on peut obtenir une valeur de pression (exprimée en bar ou en MPa) qui permet de déterminer l'état hydrique de l'organe échantillonné.

La mesure en chambre à pression comprend trois protocoles de mesure :

- le potentiel hydrique foliaire (Ψ_f)

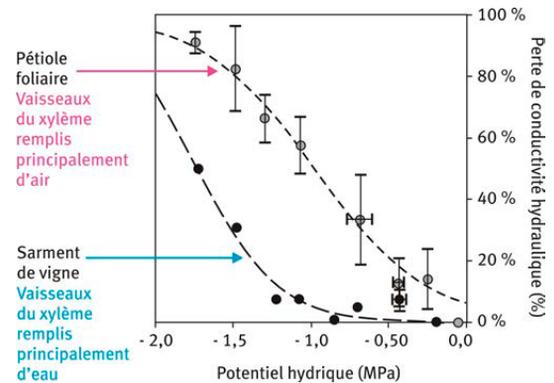


Figure 5 : courbe de vulnérabilité du xylème du pétiole et des rameaux (Scholasch & Rienth, (2020).



Photo 1 : chambre à pression de Scholander (IFV).

- le potentiel hydrique de tige (Ψ_t)
- le potentiel hydrique foliaire de base (Ψ_b)

Le potentiel hydrique foliaire

Le potentiel hydrique foliaire (Ψ_f) est généralement mesuré à midi solaire en utilisant des feuilles adultes bien exposées à la lumière.

Cependant il n'y a pas forcément d'équilibre entre le potentiel hydrique des feuilles et le potentiel hydrique des autres organes ou du sol (Scholasch et Rienh, 2020).

De plus, il varie rapidement en fonction des conditions environnementales comme la variation rapide de l'exposition des feuilles à la lumière (passage des nuages), la température et l'humidité de l'air tout au long de la journée (Scholasch et Rienh, 2020).

En conséquence, il est rarement utilisé comme indicateur fiable de l'état hydrique de la vigne.

Le potentiel hydrique de tige

Le potentiel hydrique de tige (Ψ_t) est obtenu en plaçant une feuille dans un sac en aluminium pendant 45 à 120 minutes avant la mesure.

Ainsi la feuille réduit sa transpiration et elle équilibre son potentiel hydrique par rapport à celui de la tige (pétiole) mais pas nécessairement par rapport au potentiel hydrique du rameau car, comme nous l'avons vu, celui-ci varie en fonction de la perte de conductivité hydraulique du pétiole (Scholasch et Rienh, 2020).

Ainsi, le Ψ_t reflète à un instant donné de la journée l'état de disponibilité des ressources en eau du sol (stress édaphique), la demande climatique (stress climatique) et les capacités de transfert hydraulique (conductivité de la sève brute dans les vaisseaux du xylème) (Scholasch et Rienh, 2020).

Le potentiel hydrique foliaire de base

Le potentiel hydrique foliaire de base (Ψ_b) est mesuré sur les feuilles adultes juste avant le lever du soleil. À ce moment, Ψ_b atteint son niveau quotidien maximum avant l'aube reflétant ainsi la réhydratation maximale de la vigne pendant l'obscurité en l'absence de transpiration (Rienh et Scholasch, 2021).

Quand toutes les conditions de remplissage des tissus de la plante sont réunies (c'est-à-dire avec un faible déficit en vapeur d'eau nocturne et un ratio élevé ou modéré de transpiration la journée précédente) cette mesure indique la disponibilité de l'eau dans le sol pour la plante (stress édaphique) car Ψ_b s'équilibre avec le potentiel hydrique du sol exploré par le système racinaire (Rienh et Scholasch, 2021).

Cependant, en cas de cumul de jours à forte demande évaporative, l'hypothèse d'un remplissage complet en eau de tous les tissus durant la nuit n'est plus vraie : Ψ_b reste une bonne estimation de l'état hydrique instantané de la plante mais il ne reflète plus précisément les disponibilités en eau du sol (Rienh et Scholasch, 2021).

Le tableau 2 présente les valeurs correspondantes des potentiels hydriques de base (Ψ_b), de tige (Ψ_t) et de feuille (Ψ_f) en fonction du niveau de stress hydrique (van Leeuwen et al., 2009).

	ψ base (MPa)	ψ tige (MPa)	ψ feuille (MPa)	δ 13C (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 2 : valeur du potentiel hydrique (Ψ) et du rapport 13C/12C (δ 13C) pour apprécier l'état hydrique de la vigne (van Leeuwen et al., 2009).

Méthode de discrimination à partir des isotopes du carbone

La mesure de la discrimination isotopique du carbone (δ 13C ou rapport 13C/12C) se base sur l'analyse de la composition isotopique du carbone présente dans les sucres des organes végétatifs, des baies ou des moûts de raisins.

Des chercheurs (Rienh et al., 2020) ont démontré une corrélation significative entre la composition isotopique du carbone des moûts de raisins et les valeurs des

potentiels hydriques foliaires obtenues au cours d'un même saison (tableau 2).

Bien que cette mesure soit généralement réalisée en fin de saison et ne soit donc pas appropriée pour gérer l'irrigation quotidienne ou les pratiques culturales pendant la saison, elle s'avère un outil pertinent pour évaluer l'impact des pratiques culturales, de l'irrigation et des conditions météorologiques du millésime sur l'assimilation du carbone qui est liée aux déficits en azote et en eau.

Mesure basée sur les flux de sève

Le flux de sève désigne le déplacement de l'eau à l'intérieur du xylème (des racines jusqu'aux feuilles) où elle est ensuite évaporée à travers les stomates.

La mesure de ce flux de sève permet ainsi de déterminer la quantité d'eau utilisée par la vigne.

Les capteurs de flux de sève offrent la possibilité de mesurer la transpiration d'une tige ou de la plante entière sans perturber l'environnement de la feuille (Escalona et al., 2002).

La méthode de mesure du flux de sève se base sur des principes thermiques où un élément chauffant fournit de l'énergie au système et les pertes de chaleur sont ensuite mesurées au moyen de thermocouples (Saurin et al., 2014)

Méthode de la sonde de dissipation thermique

Cette méthode utilise des sondes insérées comme des aiguilles dans la vigne (figure 6) pour évaluer le débit de sève en utilisant la chaleur comme traceur.

La sonde comprend deux aiguilles dont l'une émet de la chaleur (aiguille supérieure) tandis que l'autre mesure la température (aiguille inférieure).

La différence de température obtenue entre ces deux aiguilles permet une conversion directe en vitesse de flux de sève où un faible flux indique un déficit hydrique de la vigne.

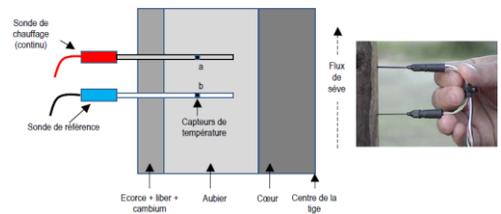


Figure 6 : schéma du principe de mesure du capteur de flux de sève par dissipation de chaleur à gauche et photo d'un capteur à droite (Saurin et al., 2014).

Cependant les variations circonférentielles et radiales de la densité du flux de sève peuvent conduire à des sous-estimations ou des surestimations du flux (Vergeynst et al., 2014) et lorsque l'aiguille chauffée est en contact avec des tissus non conducteurs le flux de sève peut être sous-estimé (Scholasch et Rienth, 2020).

Par conséquent cette méthode n'est pas appropriée pour un usage commercial.

La méthode du bilan thermique de la tige

Le capteur de flux de sève est constitué d'une languette chauffée et enroulée autour du bois (photo 2) qui fournit de la chaleur uniformément sur toute la section de la tige (Lascano et al., 2016).

Chaque extrémité de la languette chauffante est équipée d'un thermocouple mesurant la température à la surface du bois (figure 7).

La différence entre ces deux mesures reflète la quantité d'eau circulant dans la vigne.

Les capteurs peuvent être appliqués sur des tiges légèrement courbées ou partiellement nécrosées comme on peut parfois les observer suite à des plaies de taille et comme toute la section de la tige est chauffée on peut appliquer la méthode du bilan thermique même lorsque la trajectoire de l'écoulement de la sève à travers la tige est tortueuse.

Cette méthode permet de mesurer en temps réel la quantité d'eau circulant dans la vigne et sa transpiration offrant ainsi un indicateur précis pour gérer le statut hydrique.

Zhang et al., (2011) ont démontré que le bilan thermique de la tige est une méthode fiable pour



Photo 2 : un capteur de flux de sève posé sur un rameau latéral de vigne (Rienth et Scholasch, 2019).

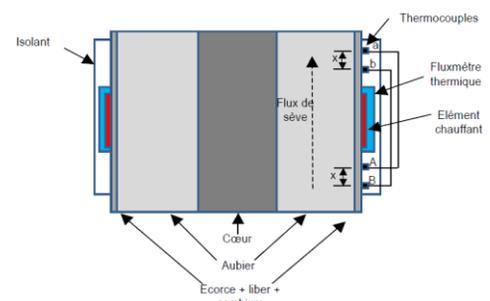


Figure 7 : schéma du principe de mesure du capteur de flux de sève par bilan thermique (Saurin et al., 2014)

calculer l'utilisation de l'eau de la vigne (c'est-à-dire la transpiration) indépendamment des autres composants de l'évapotranspiration (évaporation du sol ou transpiration des plantes couvrant le sol entre les rangs).

En raison de ces avantages les capteurs de débit de sève non intrusifs ont été largement adoptés pour orienter les stratégies d'irrigation (Ginestar et al., 1998 ; Scholasch, 2017).

Conductance stomatique (g_s)

La régulation de la diffusion des gaz à la surface de la feuille est assurée par l'ouverture stomatique qui joue un rôle essentiel dans le contrôle des pertes en eau de la plante ainsi que dans l'absorption du dioxyde de carbone nécessaire à la photosynthèse.

La conductance stomatique (g_s) est la mesure du flux de vapeur d'eau sortant ou de dioxyde de carbone entrant dans une feuille à travers ses stomates et elle est généralement exprimée en $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Il existe diverses méthodes pour mesurer la conductance stomatique mais les appareils les plus répandus sont conçus pour évaluer le taux d'humidification à l'intérieur d'une petite chambre clipsée sur une feuille (photo 3).

La conductance stomatique de la vigne diminue lorsque la demande climatique augmente et/ou que la disponibilité en eau du sol diminue permettant ainsi de préserver son hydratation et de conserver ses ressources en eau lors de périodes de stress hydrique : c'est un indicateur sensible qui reflète immédiatement le déséquilibre entre demande climatique et disponibilité hydrique du sol (Saurin et al., 2014).

Néanmoins, les mesures effectuées au niveau de la feuille révèlent habituellement une grande variabilité spatiale et temporelle.

Pour obtenir des informations pertinentes à l'échelle de la parcelle il est nécessaire de réaliser un échantillonnage important ce qui peut devenir contraignant lorsqu'il s'agit de suivre plusieurs parcelles en même temps (Saurin et al., 2014).

Imagerie infrarouge thermique (IRT)

Lorsque les stomates sont ouverts la plante transpire entraînant une diminution de la température à la surface des feuilles.

En revanche lorsque les stomates se ferment, la réduction de l'évaporation provoque une augmentation de la température à la surface des feuilles en raison de la moindre dissipation d'énergie.

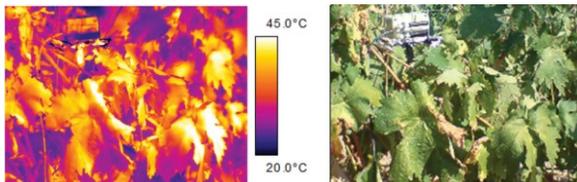


Photo 4 : visualisation infrarouge du stress hydrique sur feuilles de vigne (Grant et al., 2016).



Photo 3 : mesure de conductance stomatique sur feuille (decagon).

L'imagerie infrarouge thermique (IRT) permet de détecter ces variations de température et d'évaluer un éventuel stress hydrique (photo 4).

Cependant les premiers essais d'IRT sur les vignes ont rencontré quelques problèmes à cause de la variabilité dans l'espace et le temps de ces températures.

Grâce à l'accès récent à l'imagerie IRT, de nouvelles opportunités se sont ouvertes pour développer des outils permettant de mieux évaluer l'état hydrique de la vigne (Costa et al., 2010) et d'améliorer la gestion de l'irrigation (Baluja et al., 2012).

De nos jours il est possible d'augmenter la zone foliaire échantillonnée et d'intégrer des zones de référence humides et sèches afin de calculer divers indices tels que le Crop Water Stress Index (CWSI) et l'Index of canopy conductance (I_g) grâce aux images thermiques de haute résolution.

Plusieurs études (Möller et al., 2007 ; Pou et al., 2014) démontrent une forte corrélation entre les indices calculés (comme CWSI) et la conductance moyenne de la couverture végétale (figure 8).

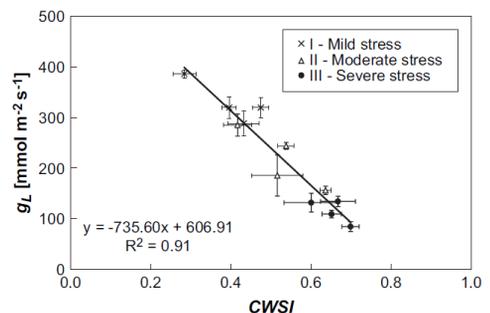


Figure 8 : relation entre conductance stomatique (g_L) et indice de stress (CWSI) calculé sur des images IRT (Möller et al., 2007)

Suivie du statut hydrique par télédétection hyper et multispectrale

Le stress hydrique entraîne des changements dans les caractéristiques biophysiques et biochimiques des tissus végétaux généralement accompagnés par une modification de leurs propriétés optiques (Laroche, 2021). Ces modifications se manifestent par des variations de couleur qui sont détectables sur les images satellites.

Une méthode en cours de finalisation permettra d'identifier de vastes zones sujettes à un stress hydrique en analysant ces images, grâce à l'arrivée des deux satellites Sentinel-2 qui permettront un suivi de la végétation avec une revisite théorique tous les 5 jours à moindre

2. Méthodes de mesure de l'état hydrique du sol

Les sondes tensiométriques et capacitives

Le principal avantage des capteurs placés directement dans le sol réside dans la surveillance continue et automatisée de l'humidité du sol.

Ces capteurs évaluent directement le niveau d'humidité du sol en utilisant soit des méthodes tensiométriques basées sur la force physique qui retient l'eau dans le sol soit des méthodes volumétriques qui mesurent le pourcentage d'eau dans un volume donné de sol.

Parmi les instruments les plus couramment utilisés nous présenterons ici les sondes tensiométriques qui mesurent l'énergie avec laquelle l'eau est retenue par les particules du sol, et les sondes capacitives qui sont un exemple de système de mesures volumétriques fréquemment utilisées au champ.

Les sondes tensiométriques

La sonde tensiométrique ne mesure pas directement la quantité d'eau dans le sol mais sa disponibilité pour la plante.

Placée à proximité des racines, elle évalue la force que la racine doit appliquer pour extraire l'eau du sol et alimenter la plante : cela correspond au potentiel hydrique matriciel.

Cette mesure est exprimée en centibars (cbars).

Les sondes tensiométriques utilisent un capteur situé à l'extrémité de la sonde dans une bougie poreuse en gypse qui est perméable à l'eau. Cette bougie se remplit d'eau jusqu'à ce qu'un équilibre des pressions soit atteint entre le sol et le tensiomètre. Ensuite le tensiomètre mesure la pression en fonction de la quantité d'eau absorbée par la plante.

Les valeurs obtenues par le tensiomètre sont numérotées de 0 cbars (sol saturé ou capacité au champ) à 200 cbars (sol desséché).

Les sondes tensiométriques permettent une évaluation rapide de la disponibilité en eau mais elles ont une portée limitée en profondeur. Il est donc souvent nécessaire d'installer plusieurs sondes tensiométriques à des profondeurs différentes ce qui peut entraîner des problèmes de représentativité à cause de la perturbation du site de mesure.

Les résultats fournis par ce capteur varient en fonction du dessèchement ou du remplissage du sol :

- lorsque le sol est sec, la bougie de gypse peut prendre un certain temps pour se rééquilibrer avec le sol environnant,
- à la capacité au champ, le tensiomètre indique une valeur de zéro qui ne fournit pas d'informations entre cette valeur de capacité au champ et le niveau de saturation en eau du sol pendant que les macroporosités du sol se vident ou se remplissent d'eau.

Les sondes capacitives

La sonde capacitive constitue un outil de mesure polyvalent capable d'évaluer l'humidité, la température et éventuellement la salinité du sol à intervalles de 10 cm.

Différentes tailles de sondes existent pour s'adapter aux divers types de sols et cultures permettant ainsi des mesures à différentes profondeurs.

Le principe de mesure de l'humidité du sol repose sur l'utilisation d'une onde électromagnétique qui se propage à travers le sol grâce à l'eau : plus la teneur en eau dans le sol est élevée et plus cette onde se déplace rapidement.

Ce système offre la possibilité de suivre la consommation d'eau par la plante, l'évaporation ainsi que le développement du système racinaire en profondeur.

Limites d'utilisation des sondes au vignoble

Le principal avantage des sondes implantées dans le sol réside dans leur capacité à fournir une surveillance continue et automatisée de l'humidité du sol.

Cependant en viticulture l'utilisation de capteurs d'humidité du sol présente plusieurs inconvénients :

- les sols pierreux et hétérogènes dans les vignobles rendent difficile leur installation malgré l'utilisation de la cartographie des sols pour mieux définir leur placement. En effet le morcellement et l'hétérogénéité des parcelles sur de courtes distances nécessitent un grand nombre de capteurs entraînant un coût financier élevé,
- les capteurs au sol exigent un entretien fréquent, ils ont une durée de vie limitée, et ils sont particulièrement vulnérables aux dommages causés par la machinerie lourde lors des opérations de travail du sol, de tonte et autres interventions liées au sol,
- l'enracinement profond de la vigne limite l'estimation de l'eau disponible dans le sol mesurée par le capteur par rapport à l'eau réellement accessible pour la vigne, en particulier lorsqu'elle puise de l'eau dans des couches plus profondes du sol qui ne sont pas détectées par le capteur.

Méthodes de bilan hydrique

Pour finir, les calculs du bilan hydrique du sol représentent une méthode indirecte permettant d'évaluer l'état hydrique de la vigne et de guider l'irrigation au cours de la saison.

Cette approche permet d'estimer par modélisation à la fois la quantité totale d'eau présente dans le sol et la partie de cette eau qui est potentiellement transpirée par la plante.

La connaissance des entrées d'eau (irrigation et précipitations) et des pertes d'eau (ruissellement, drainage et évapotranspiration) permettent d'estimer la variation de l'humidité du sol au cours de la saison (Lebon et al., 2003).

La quantité totale d'eau pouvant être transpirée correspond à la capacité maximale de rétention d'eau du sol moins la quantité d'eau du sol qui n'est pas disponible au point de flétrissement.

Le modèle débute lorsque le sol est à la capacité au champ et il procède à une mise à jour quotidienne de la teneur en eau du sol où la quantité d'eau transpirable restante dans le sol (TSWt) est calculée à la date "t" en utilisant la formule suivante :

$$TSWt = TSWt-1 + \text{Raint} + \text{It} - (\text{Runofft} + \text{Est} + \text{Tcropt})$$

avec :

TSWt : estimation de l'eau totale disponible à la date « t » ; **Raint** : précipitation à la date « t » ; **It** : irrigation à la date « t » ; **Runofft** : ruissellement à la date « t » ; **Est** : évapotranspiration du sol (avec ou sans couverture herbeuse) à la date « t » ; **Tcropt** : transpiration à partir de la canopée de la vigne à la date « t »

Références bibliographiques pour aller plus loin...

Baluja, J., Diago, M. P., Balda, P., Zorer, R., Meggio, F., Morales, F., & Tardaguila, J. (2012). Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrigation Science*, 30, 511-522.

Bernard, N., Deloire, A., & Zebic, O. (2004). Estimation de l'état hydrique de la vigne par la mesure de la température foliaire: Un outil au service des professionnels. *Le Progrès agricole et viticole*, 121(23), 539-542.

Bernardo, S., Dinis, L. T., Machado, N., & Moutinho-Pereira, J. (2018). Grapevine abiotic stress assessment and search for sustainable adaptation strategies in Mediterranean-like climates. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 1-20.

Charrier, G., Torres-Ruiz, J. M., Badel, E., Burrett, R., Choat, B., Cochard, H., ... & Delzon, S. (2016). Evidence for hydraulic vulnerability segmentation and lack of xylem refilling under tension. *Plant physiology*, 172(3), 1657-1668.

Costa, J. M., Grant, O. M., & Chaves, M. M. (2010). Use of thermal imaging in viticulture: current application and future prospects. *Methodologies and results in grapevine research*, 135-150.

Escalona, J., Flexas, J., & Medrano, H. (2002). Drought effects on water flow, photosynthesis and growth of potted grapevines. *VITIS-GEILWEILERHOF*-, 41(2), 57-62.

Fiche technique n°19

Méthodes de mesure du statut hydrique de la vigne

- Ginestar, C., Eastham, J., Gray, S., & Iland, P. (1998).** Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. II. Effects of post-veraison water deficits on composition of Shiraz grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49(4), 421-428.
- Hochberg, U., Bonel, A. G., David-Schwartz, R., Degu, A., Fait, A., Cochard, H., ... & Herrera, J. C. (2017).** Grapevine acclimation to water deficit: the adjustment of stomatal and hydraulic conductance differs from petiole embolism vulnerability. *Planta*, 245, 1091-1104.
- Laroche, E. (2021).** *Suivi du statut hydrique de la vigne par télédétection hyper et multispectrale* (Doctoral dissertation, Toulouse, INPT).
- Lascano, R. J., Goebel, T. S., Booker, J., Baker, J. T., & Gitz III, D. C. (2016).** The stem heat balance method to measure transpiration: Evaluation of a new sensor. *Agricultural Sciences*, 7(09), 604.
- 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.
- Möller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., ... & Cohen, S. (2007).** Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of experimental botany*, 58(4), 827-838.
- Ojeda, H., & Saurin, N. (2014).** L'irrigation de précision de la vigne: méthodes, outils et stratégies pour maximiser la qualité et les rendements de la vendange en économisant de l'eau. *Innovations Agronomiques*, 38, 97-108.
- Pellegrino, A., Clingeleffer, P., Cooley, N., & Walker, R. (2014).** Management practices impact vine carbohydrate status to a greater extent than vine productivity. *Frontiers in Plant Science*, 5, 283.
- Pichon, L., Brunel, G., Payan, J. C., & Tisseyre, B. (2020).** Apex-Vigne: A mobile application to facilitate the monitoring of growth and estimate the water status of the viticulture plots: Original language of the article: French. *IVES Technical Reviews, vine and wine*.
- Pou, A., Diago, M. P., Medrano, H., Baluja, J., & Tardaguila, J. (2014).** Validation of thermal indices for water status identification in grapevine. *Agricultural water management*, 134, 60-72.
- Quénol, H., de Cortazar Aauri, I. G., Bois, B., Sturman, A., Bonnardot, V., & Le Roux, R. (2017).** Which climatic modeling to assess climate change impacts on vineyards?. *Oeno One*, 51(2), 91-97.