



HAL
open science

Comment mesurer la contrainte hydrique de la vigne, de la plante au vignoble

Nicolas Saurin, Bruno Tisseyre, Eric Lebon

► To cite this version:

Nicolas Saurin, Bruno Tisseyre, Eric Lebon. Comment mesurer la contrainte hydrique de la vigne, de la plante au vignoble. *Innovations Agronomiques*, 2014, 38, pp.143-158. hal-01259743

HAL Id: hal-01259743

<https://hal.science/hal-01259743>

Submitted on 27 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Comment mesurer la contrainte hydrique de la vigne, de la plante au vignoble

Saurin N.¹, Tisseyre B.², Lebon E.³

¹ UE 999, Unité Expérimentale de Pech Rouge, INRA, 11430 Gruissan, France.

² UMR ITAP, Information - Technologies - Analyse Environnementale - Procédés Agricoles, Montpellier SupAgro - IRSTEA, 2 place Viala, 34060 Montpellier, France.

³ UMR 759 LEPSE, Laboratoire d'Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux, INRA - Montpellier SupAgro, 2 Place Viala, 34060 Montpellier, France.

Correspondance : nicolas.saurin@supagro.inra.fr

Résumé

L'irrigation de précision est essentielle dans les zones arides et semi-arides confrontées à des réserves en eau limitées. Cela a poussé la communauté scientifique à développer de nouvelles technologies pour le pilotage de l'irrigation permettant de rationaliser les apports en fonction des besoins de la culture vis-à-vis des objectifs de production. Parmi celles-ci, les indicateurs de stress hydrique mesurés directement sur la plante ont démontré le plus grand potentiel. Ainsi, les mesures de potentiel hydrique foliaire, de température du couvert, de flux de sève, ou de variation de diamètre de tronc, entre autres variables, se sont révélés utiles non seulement pour des fins de recherche, mais aussi de façon applicatives dans les vignobles commerciaux. Couplées à des modèles d'extrapolation spatiale basés sur des données auxiliaires à moyenne ou haute résolution ($\delta^{13}\text{C}$, NDVI) ces méthodes peuvent permettre de piloter l'irrigation tout en prenant en compte l'hétérogénéité spatiale de l'état hydrique du vignoble.

Mots-clés : déficit hydrique, indicateur de croissance, potentiel hydrique, conductance stomatique, imagerie infrarouge thermique, flux de sève, dendrométrie, psychrométrie *in situ*, extrapolation spatiale, $\delta^{13}\text{C}$.

Abstract: How to measure water stress in grapevine, from the plant to the vineyard

Precision irrigation is essential in arid and semi-arid regions facing limited water reserves. This has led the scientific community to develop new technologies for irrigation management to streamline the water supply to the needs of culture to fit production targets. Among these, water stress indicators measured directly on the plant have shown the greatest potential. Thus, measurements of leaf water potential, canopy temperature, sap flow, or variation of trunk diameter, among other variables, have proven useful not only for research purposes, but also for applications in commercial vineyards. In association with spatial extrapolation models based on medium or high resolution auxiliary data ($\delta^{13}\text{C}$, NDVI, etc.) these methods can be used to control irrigation taking into account the spatial variability of plant water status over the vineyard.

Keywords: water deficit, growth indicator, water potential, stomatal conductance, thermal infrared imaging, sap flow, dendrometer, *in situ* psychrometer, spatial extrapolation, $\delta^{13}\text{C}$.

Introduction

L'évolution du climat dans le sud de l'Europe se traduit par une augmentation de la demande climatique, conséquence de l'augmentation des températures et un changement dans la distribution

annuelle des précipitations, moins abondantes l'été (Lespinas *et al.*, 2010; Lebon et Cortazar Aauri, 2014). Cette tendance climatique perceptible dès le début des années 2000 a conduit les régions viticoles du Languedoc-Roussillon et de PACA à développer des infrastructures hydrauliques et des systèmes d'irrigation. Les besoins nouveaux qui en résultent et plus globalement la concurrence croissante pour l'utilisation des ressources en eau (Hoang *et al.*, 2012) imposent de rechercher une efficacité maximale de l'irrigation. C'est la raison pour laquelle il est impératif de disposer de méthodes de pilotage de l'irrigation de plus en plus précises afin d'optimiser les apports hydriques. Ces méthodes reposent sur i) des techniques permettant de quantifier l'état hydrique de la vigne, ii) une connaissance des réponses de la vigne à la contrainte hydrique et iii) des stratégies d'irrigation adaptées à l'objectif de production (Ojeda et Saurin, 2014). Cette synthèse a pour objet de faire un état de l'art sur les principales méthodes déjà utilisées ou bien en cours d'expérimentation pour le pilotage de l'irrigation de la vigne.

Mesurer l'état hydrique de la vigne

Jusqu'à une date récente, le pilotage de l'irrigation de la vigne dans les pays où cette pratique était autorisée était fréquemment basé sur des approches qui visaient à compenser par des apports d'eau, tout ou partie des besoins hydriques potentiels de la vigne. Ces approches s'appuient alors sur une estimation de la demande climatique et des besoins potentiels de la vigne, en fonction de son stade de développement (Peacock *et al.*, 2000). Ces besoins sont estimés au travers d'un coefficient Kc fourni par des tables ou mesuré au vignoble (Williams et Ayars, 2005). Si ce mode de pilotage est adapté aux vignobles des régions arides ou semi-arides où les pluies sont quasi-absentes et la demande climatique très importante pendant le cycle végétatif, il est difficilement transposable aux régions à climats tempérés tels que ceux caractéristiques des régions méditerranéennes où l'irrigation vient seulement compléter l'eau apportée par les pluies. Dans ces conditions, les méthodes basées sur une estimation directe de l'état ou de la réponse hydrique du végétal doivent être privilégiées (Jones, 2004).

Une première réflexion doit être conduite pour choisir les mesures les plus adaptées au pilotage de l'irrigation. Le choix peut se porter sur des mesures directes de l'état hydrique ou bien des processus physiologiques répondant à l'état hydrique de la plante (Jones, 2004). A ce stade, il est important de tenir compte de la sensibilité de ces mécanismes, variable selon les espèces. La vigne est décrite comme une espèce à comportement isohydrique qui possède une capacité de régulation stomatique de la transpiration très efficace assurant un fort degré d'homéostasie. Cette spécificité conduit à privilégier la mesure d'indicateurs basés sur les réponses hydriques plutôt que sur l'état hydrique même de la plante. Un second point à considérer dans ce choix concerne la sensibilité du paramètre mesuré aux conditions climatiques. Un indicateur dont le résultat dépend plus ou moins étroitement du climat nécessite des mesures de paramètres climatiques pour pouvoir être utilisé.

Dans un objectif finalisé, tel que celui du pilotage de l'irrigation, le mode d'acquisition et de gestion de l'information revêt une importance particulière. Le praticien est amené à suivre un ensemble d'unités de production pour lesquels le suivi manuel avec une fréquence suffisante (généralement hebdomadaire) demeure excessivement lourd et coûteux. Bien que les techniques de mesure de la plupart des indicateurs « plante » soient peu adaptées à l'acquisition automatique délivrant des données en continu avec une résolution temporelle très fine (de l'ordre de la minute ou de l'heure), un effort important a été réalisé au cours de ces dernières années pour mettre à disposition de la profession des chaînes d'acquisition intégrées à des systèmes d'information permettant le suivi en continu d'indicateurs du fonctionnement hydrique de la vigne.

Méthodes manuelles

Indicateur de croissance

L'état de croissance des vignes est un paramètre intégrateur de leur comportement végétatif, dépendant principalement des niveaux d'alimentation hydrique et de nutrition azotée. La « méthode des apex » est proposée pour évaluer l'état de croissance végétative des vignes (Rodriguez-Lovelie *et al.*, 2009). C'est une méthode de terrain, simple d'application et non destructive, qui consiste à noter l'état de la zone de croissance terminale des rameaux principaux selon trois classes (Figure 1).

Des travaux sont conduits depuis plusieurs années afin d'établir des seuils de référence pour déclencher le début de la campagne d'irrigation. Au-delà de la première irrigation, cet indicateur n'est plus utilisable car l'état hydrique qui est généralement recherché se situe en deçà du seuil d'arrêt de croissance.



Figure 1 : Photos des 3 stades d'apex. A gauche : pousse active, les feuilles ne recouvrent pas l'apex. Au centre : ralentissement, les feuilles recouvrent l'apex. A droite : apex sec. Crédit photo : Chambre d'Agriculture de l'Hérault.

Potentiel hydrique foliaire (Ψ_f , Ψ_t , Ψ_b)

Le potentiel hydrique est un des paramètres les plus couramment utilisés pour mesurer l'état hydrique de la vigne (Choné *et al.*, 2001 ; Williams et Araujo, 2002 ; Pellegrino *et al.*, 2005 ; Girona *et al.*, 2006). Cette mesure s'est imposée avec le développement de la chambre à pression (Scholander *et al.*, 1965) dont différents modèles sont commercialisés. Cet équipement permet d'accéder, selon le mode de mesure, au potentiel hydrique en différents points du système sol-plante-atmosphère. Trois indicateurs sont plus particulièrement utilisés en routine : le potentiel foliaire à midi (Ψ_f), le potentiel de tige (Ψ_t) et le potentiel foliaire de base (Ψ_b). L'irrigation est déclenchée en fonction du dépassement de valeurs seuils propres à chaque indicateur et fonction des objectifs de production (Ojeda et Saurin, 2014). Le potentiel foliaire minimal mesuré en milieu de journée (Ψ_f) sur des feuilles éclairées renseigne sur l'état d'hydratation minimal atteint par la plante. Il répond à une combinaison de facteurs tels que la demande climatique locale, les disponibilités hydriques de la vigne, la conductance stomatique et la conductivité hydraulique du système vasculaire xylémien. Les valeurs mesurées présentent en conséquence une importante variabilité spatiale et temporelle. Les travaux montrent par ailleurs que les valeurs atteintes dans une gamme assez large de conditions hydriques sont peu discriminantes (Schultz, 1995; Choné *et al.*, 2001). Ceci s'explique par l'efficacité du contrôle stomatique de la transpiration chez les plantes iso-hydriques telles que la vigne (Simonneau *et al.*, 2014). Une solution pour limiter la variabilité observée consiste à utiliser des feuilles préalablement ensachées dans des sacs opaques à la lumière et dont le potentiel est en équilibre avec le potentiel hydrique du xylème (Ψ_t). Ces mesures dites de « potentiel de

tige » sont classiquement réalisées en milieu de journée dans des conditions similaires à celles de la mesure du potentiel foliaire (Figure 2). Cet indicateur est utilisé par un certain nombre d'auteurs pour caractériser l'état hydrique de la vigne en conditions de déficit faible à modéré et en particulier le contrôle en routine de l'état hydrique de vignobles irrigués (Choné *et al.*, 2001 ; Acevedo-Opazo *et al.*, 2008).

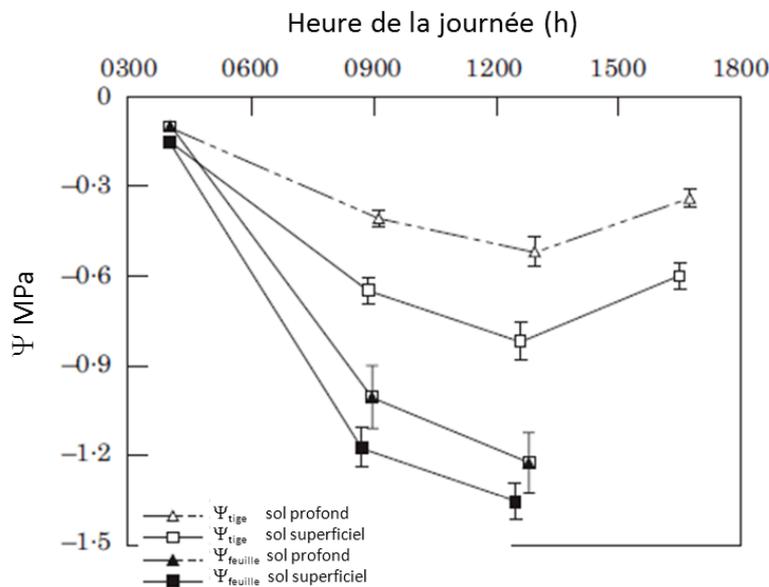


Figure 2 : Evolution du potentiel de tige (Ψ_t) et du potentiel foliaire (Ψ_f) au cours d'une journée sur deux parcelles voisines ayant des sols de profondeur contrastée (Cépage Cabernet Sauvignon, Californie) (d'après Choné *et al.*, 2002).

En fin de nuit, le potentiel hydrique foliaire s'équilibre sur l'ensemble du continuum-sol-plante-atmosphère (Simonneau *et al.*, 2014). Dans ces conditions particulières de transpiration nulle, la mesure du potentiel foliaire (« potentiel foliaire de base », Ψ_b) permet d'approcher le potentiel hydrique moyen du sol dans la zone racinaire. Ce paramètre présente l'avantage d'être peu sensible aux conditions climatiques. Cependant, les conditions idéales de mesures (flux transpiratoire nul) ne sont pas toujours réunies en fin de nuit car la demande climatique peut demeurer sensible (nuits chaudes et ventées) et la fermeture stomatique ne pas être totale. Ces conditions conduisent à une sous-estimation de l'état hydrique du sol. Enfin, en situations de répartition hétérogène de l'eau dans le sol, le potentiel foliaire de base s'équilibre préférentiellement avec les horizons du sol les plus humides (Améglio *et al.*, 1999). Malgré ces limites, Ψ_b est considéré par beaucoup d'auteurs comme la référence pour quantifier l'état hydrique du vignoble.

Conductance stomatique (g_s)

L'ouverture stomatique est le principal déterminant de la conductance à la diffusion des gaz à la surface de la feuille. Elle contrôle à la fois les pertes d'eau de la plante et l'acquisition du dioxyde de carbone pour la photosynthèse. Différents systèmes de mesure existent mais les appareils les plus couramment utilisés mesurent le taux d'humidification à l'intérieur d'une chambre de petite dimension clipsée sur une feuille. En raison de son caractère isohydrique, g_s chez la vigne est très sensible au déséquilibre entre demande climatique et disponibilité hydrique du sol. Elle baisse à mesure que la demande climatique augmente et/ou que la disponibilité de l'eau dans le sol diminue. Il s'agit donc d'un indicateur qui reflète de façon instantanée, la sévérité de ce déséquilibre. Les mesures réalisées à l'échelle de la feuille montrent généralement une très forte variabilité spatiale et temporelle. Acquérir une information pertinente à l'échelle de la placette nécessite un échantillonnage conséquent qui devient un facteur limitant lorsqu'il s'agit de suivre un ensemble de parcelles.

Imagerie infrarouge thermique (IRT)

Cette technique est basée sur le fait que le flux de transpiration engendre une diminution de la température de surface de la feuille. Lorsque les stomates se ferment, la diminution de la fraction d'énergie dissipée par évaporation provoque une élévation de cette température. Cette propriété est utilisée depuis longtemps pour estimer le degré d'ouverture des stomates sur les couverts couvrants (Idso *et al.*, 1981 ; Jackson *et al.*, 1981). Cependant, les premières tentatives d'utilisation de cette technique avec des capteurs IRT ponctuels sur vigne se sont heurtées au problème de variabilité dans l'espace et le temps de ces températures. L'accès récent à l'imagerie IRT a ouvert de nouvelles perspectives pour la mise au point d'outils permettant d'appréhender l'état hydrique de la vigne (Jones *et al.*, 2002 ; Costa *et al.*, 2010) et le pilotage de l'irrigation (Jones *et al.*, 1999 ; Jones et Leinonen, 2003 ; Grant *et al.*, 2007 ; Baluja *et al.*, 2012). Les images thermiques à haute résolution obtenues permettent d'accroître considérablement la surface foliaire échantillonnée et d'intégrer des surfaces de référence humide et sèche permettant de calculer différents indices (Crop Water Stress Index, CWSI; Index of canopy conductance, Ig). L'analyse comprend une étape de traitement d'image au cours de laquelle seules les surfaces de feuilles éclairées sont sélectionnées et retenues dans l'analyse (Figure 3). Différents travaux montrent que les indices calculés sont fortement corrélés à la conductance moyenne de couvert mesurée par porométrie (Möller *et al.*, 2007 ; Pou *et al.*, 2014) (Figure 4).

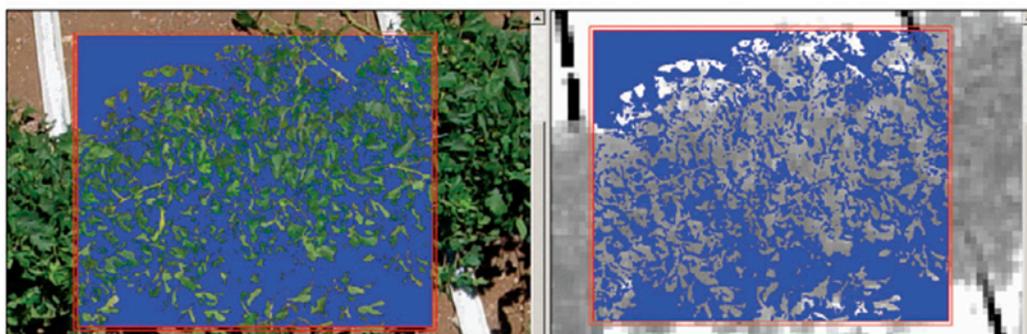


Figure 3 : Superposition d'une image visible (à gauche) après suppression des zones de sol et du feuillage à l'ombre et d'une image thermique en niveaux de gris (à droite) (d'après Möller *et al.*, 2007).

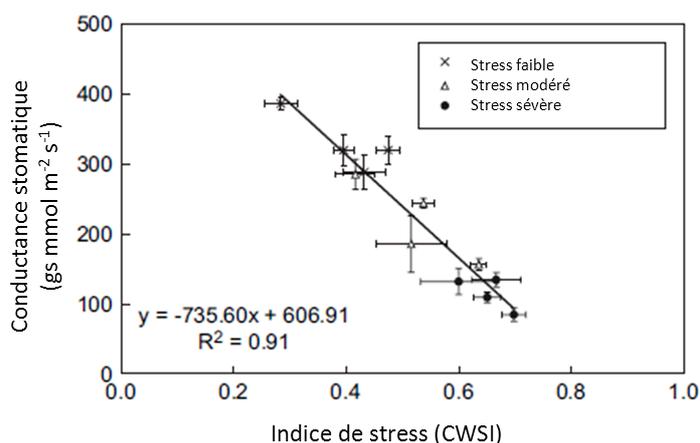


Figure 4 : Relation entre conductance stomatique et indice de stress (CWSI) calculé sur des images IRT (d'après Möller *et al.*, 2007).

Méthodes automatiques

L'apparition des premières centrales d'acquisition autonomes dans les années 1970 puis celles des premiers capteurs de flux de sève ou de dendromètre dans les années 1980 ont permis d'étudier *in situ* et en continu le comportement physiologique de la vigne. Couplés à des systèmes de transmission sans fil de l'information, ces méthodes peuvent s'intégrer à des systèmes d'information donnant accès à distance et en instantané à l'état hydrique du vignoble. Le pilotage de l'irrigation peut alors se faire en

continu. Néanmoins, l'installation de ces capteurs sur la vigne est souvent délicate et un contrôle ou une maintenance sur site est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement du dispositif et la qualité de la mesure. La qualité des mesures au vignoble dépend fortement du savoir-faire des utilisateurs. Par ailleurs, contrairement aux mesures manuelles où l'échantillonnage se fait sur plusieurs feuilles, les capteurs permettant une mesure en continu peuvent s'installer sur tronc ou tige et intègrent donc la plante entière ou une portion significative de celle-ci (Escalona *et al.*, 2002).

Flux de sève

Les capteurs de flux de sève permettent une mesure directe de la transpiration d'une tige ou de la plante entière sans perturber l'environnement de la feuille (Escalona *et al.*, 2002). Bien que les variations de transpiration soient déterminées principalement par des variations d'ouverture stomatique, la transpiration est aussi influencée par l'environnement climatique. De ce fait, les variations du flux de sève peuvent ne pas être liées à des variations d'ouverture stomatique (Jones, 2004). Généralement, les données de transpiration sont utilisées pour calculer un coefficient de stress K_s faisant intervenir l'évapotranspiration ET_0 calculée à partir des données météo et un coefficient de culture K_c prenant en compte les caractéristiques du couvert végétal et en particulier son efficacité d'interception du rayonnement (Allen *et al.*, 1998).

Il existe différentes méthodes de mesure de flux de sève (Figures 5 à 7) mais toutes reposent sur des principes thermiques. Un élément chauffant apporte de l'énergie au système et les pertes de chaleur sont mesurées à l'aide de thermocouples. Les principales méthodes utilisées pour la vigne sont la méthode du bilan de chaleur (Sakuratani, 1981 ; Steinberg *et al.*, 1989 ; Valancogne *et al.*, 1989), la méthode de dissipation de chaleur dite méthode « Granier » (Granier, 1985) et les méthodes par impulsion de chaleur (Cohen *et al.*, 1981 ; Swanson et Whitfield, 1981 ; Green, 1998 ; Burgess *et al.*, 2001).

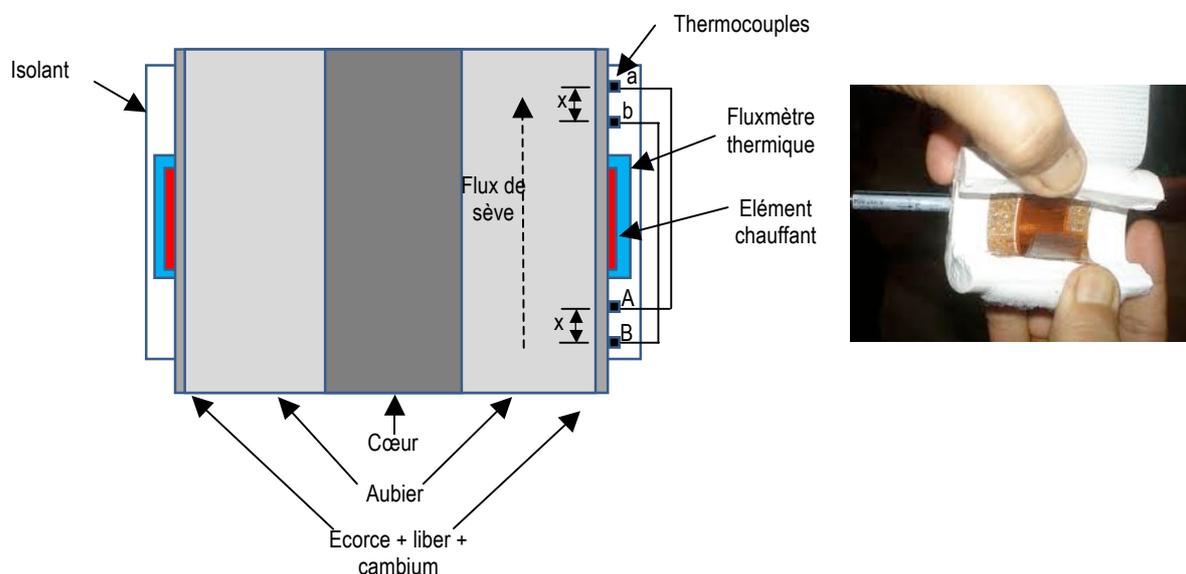


Figure 5 : A gauche : schéma du principe de mesure du capteur de flux de sève par bilan de chaleur. A droite : photo d'un capteur Dynagage™ (crédit photo : LABQUIP (M) SDN. BHD).

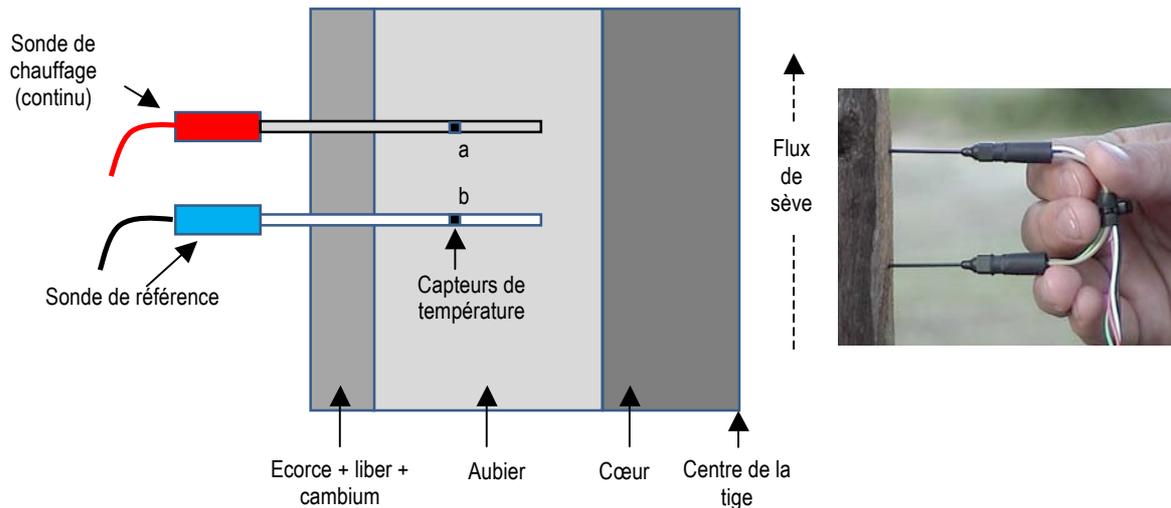


Figure 6 : A gauche : schéma du principe de mesure du capteur de flux de sève par dissipation de chaleur (méthode Granier). A droite : photo d'un capteur (crédit photo : ICT International).

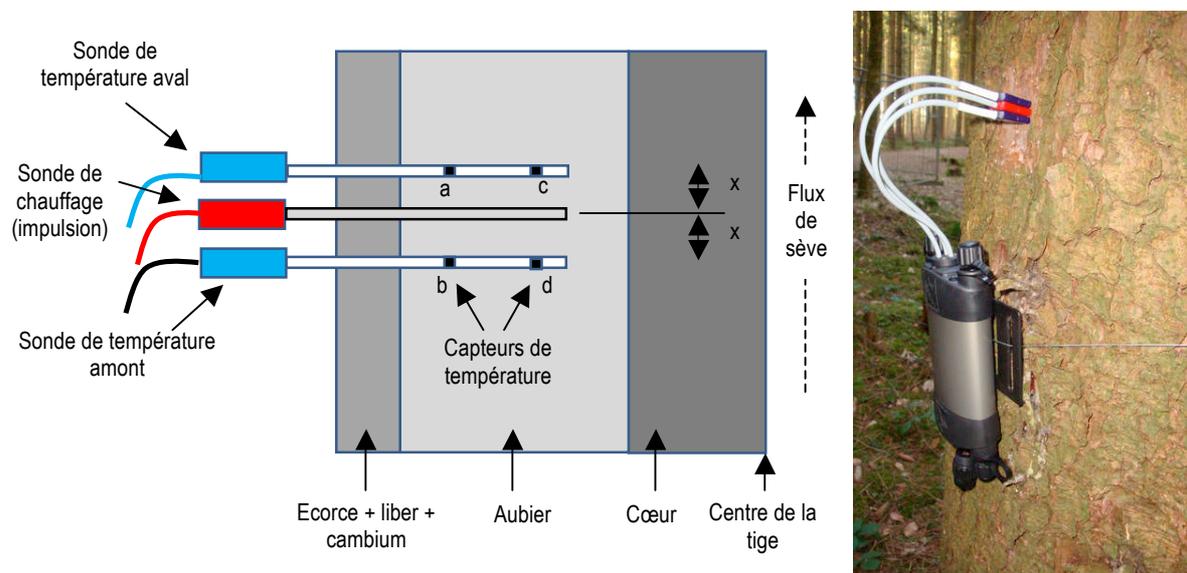


Figure 7 : A gauche : schéma du principe de mesure du capteur de flux de sève par impulsion de chaleur. A droite : photo d'un capteur (crédit photo : Umwelt-Geräte-Technik GmbH).

Ces méthodes permettent une mesure de la transpiration avec une erreur de l'ordre de 10%, voire inférieure (Sakuratani, 1981 ; Steinberg *et al.*, 1989 ; Valancogne *et al.*, 1989 ; Granier, 1985 ; Cohen *et al.*, 1981 ; Swanson et Whitfield, 1981 ; Green, 1998 ; Burgess *et al.*, 2001 ; Lascano *et al.*, 1992 ; Braun et Schmid, 1999 ; Yunusa *et al.*, 2000). Comme ces techniques sont basées sur des mesures de températures, elles peuvent de ce fait être perturbées par des modifications rapides de l'environnement thermique. Une bonne isolation du système contre le rayonnement solaire direct ainsi que l'éloignement du capteur par rapport à la surface du sol sujette à de fortes amplitudes thermiques permettent de fiabiliser ces mesures (Gutiérrez *et al.*, 1994 ; Grime et Sinclair, 1999). L'installation elle-même sur la vigne peut s'avérer délicate car l'irrégularité des sections conductrices des troncs est accentuée par les plaies de taille réalisées au moment de leur formation. Enfin, ces méthodes de contact (bilan de chaleur) ou intrusives (Granier et impulsion de chaleur) peuvent, si elles sont mal maîtrisées, modifier le fonctionnement de la plante. Notons que les méthodes à aiguilles ne fournissent que la vitesse

moyenne de la sève brute dans les tissus conducteurs actifs. Pour obtenir le flux total de sève, il est donc nécessaire d'estimer l'aire de la section transversale de xylème fonctionnelle.

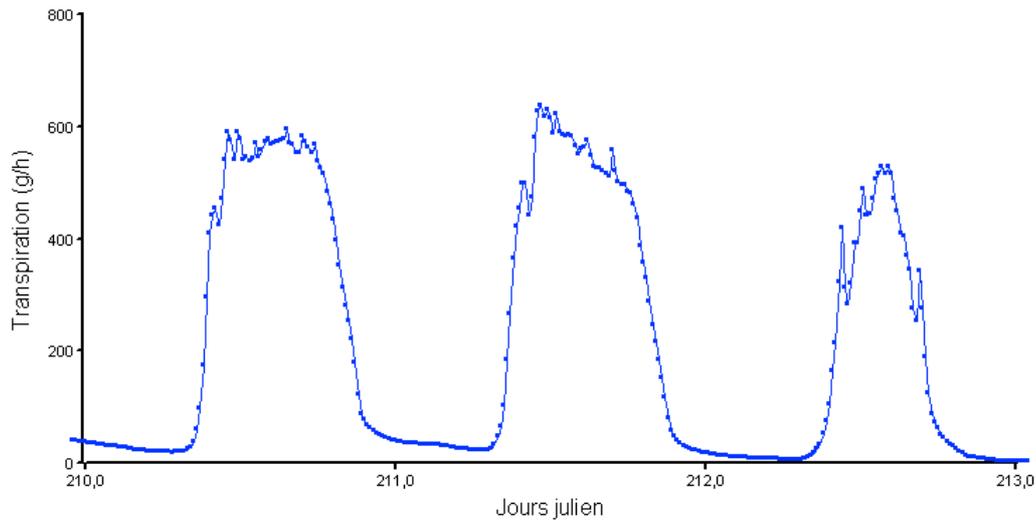


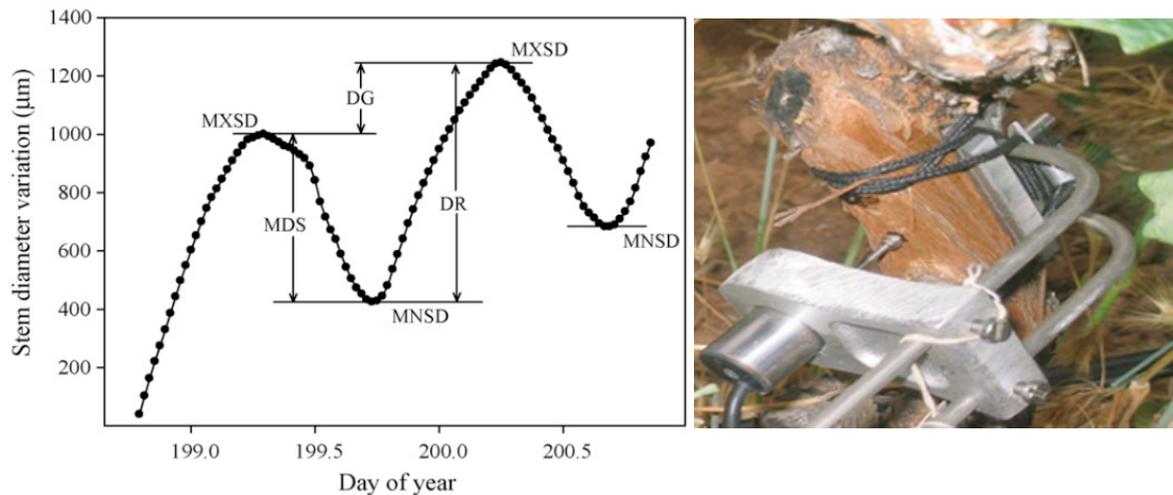
Figure 8 : Exemple de variation de flux de sève sur un cep de vigne (cépage Merlot, France).

Ces différentes méthodes sont largement utilisées pour l'expérimentation au vignoble en vue du pilotage de l'irrigation (Ginestar *et al.*, 1998 ; Yunusa *et al.*, 2000 ; Escalona *et al.*, 2002 ; Fernandez *et al.*, 2008 ; Ferreira *et al.*, 2012). Aujourd'hui, plusieurs systèmes de mesure sont présents sur le marché, intégrant pour certains des systèmes d'acquisition et de transmission sans fil de l'information (Dynamax, ICT International, Advanced Measurements and Controls Inc, Tranzflo NZ Ltd, EKOMATIK, UP-GmbH). En dehors des applications de recherche, ces capteurs sont aussi utilisés dans des vignobles commerciaux (Fruition Sciences).

Dendrométrie

Les dendromètres permettent de mesurer les micro-variations du diamètre du tronc qui peuvent informer sur la croissance de la plante et son état hydrique. Les variations de diamètre de tronc reflètent une combinaison de quatre phénomènes : une croissance radiale irréversible, une déshydratation/réhydratation réversibles des cellules vivantes, une expansion et contraction thermique, et une expansion des éléments conducteurs morts due à l'augmentation et au relâchement des tensions internes (Daudet *et al.*, 2005). L'expansion et la contraction des tissus extensibles sont liées aux variations de la teneur en eau et au potentiel de turgescence des cellules (Escalona *et al.*, 2002). Ils fournissent une information indirecte sur les flux de transpiration pendant la journée. Ces variations sont elles aussi sensibles aux fluctuations climatiques. Différents indicateurs peuvent être construits à partir des mesures de dendrométrie (Figure 9).

Un dendromètre est constitué d'un capteur de déplacement linéaire LVDT (Linear Variable Differential Transformer) et d'un support métallique en Invar (alliage fer-nickel à très faible coefficient de dilatation) permettant de fixer le capteur sur l'élément à mesurer (tige, branche ou fruit). Bien qu'étant robuste, le LVDT requiert une maintenance lors de son application au champ, particulièrement en cas de croissance rapide du tronc ou de la tige et une protection adaptée contre tout contact physique potentiel (passage dans le rang, gouttes de pluie, oiseaux, insectes) pouvant bruite la mesure (Ortuño *et al.*, 2010).



MXSD = maximum stem diameter

MNSD = minimum stem diameter

$MDS_{DOY} = \text{maximum daily shrinkage} = MXSD_{DOY} - MNSD_{DOY}$

$DR_{DOY} = \text{daily recovery} = MXSD_{DOY+1} - MNSD_{DOY}$

$DG_{DOY} = \text{daily growth} = MXSD_{DOY+1} - MXSD_{DOY}$

$SGR_{DOY} = \text{stem growth rate} = DG \text{ for } N \text{ days} = MXSD_{DOY+1} - MXSD_{DOY-N}$

$CG = \text{cumulative growth, for } N \text{ days} = \sum_{DOY-N}^{DOY} DG$

Figure 9 : A gauche : Variations de diamètre sur un olivier et indices associés (d'après Fernandez *et al.*, 2010). A droite : Photo d'un dendromètre installé sur un cep de vigne (crédit photo : Dr. F. Intrigliolo, ACIREALE, Italy).

Peu de travaux ont été réalisés sur la vigne. Les quelques travaux existants mettent en évidence des difficultés ou peu de corrélation avec l'état hydrique de la plante. La dendrométrie peut être utile pour détecter un stress modéré tôt dans la saison, mais l'intensité du stress ne peut pas être quantifiée (Van Leeuwen *et al.*, 2000). Des relations entre des indicateurs issus des variations de diamètre de tronc et le potentiel hydrique de tige et de base ont été obtenues avant véraison, mais pas après véraison, remettant en question l'intérêt de la mesure pour le pilotage de l'irrigation de la vigne (Intrigliolo et Castel, 2007 ; Montoro *et al.*, 2011). Toutefois, de nombreux travaux ont été réalisés sur d'autres cultures et témoignent d'un intérêt de la dendrométrie pour le pilotage de l'irrigation : pêcher (Feres *et al.*, 1999), pommier (Noar et Cohen, 2003 ; Doltra *et al.*, 2007), amandier (Feres *et al.*, 2003), citronnier (Velez *et al.*, 2007), olivier (Moriani *et al.*, 2013). A noter qu'une offre commerciale existe (le Pepista®).

Psychrométrie *in situ*

La mesure de référence pour le pilotage de l'irrigation est le potentiel hydrique foliaire (Ψ). Celui-ci est aujourd'hui mesuré avec la chambre à pression (Scholander *et al.*, 1965) de façon manuelle. L'accès à une mesure en continu du potentiel hydrique présente un grand intérêt pour le pilotage de l'irrigation. Elle pourrait être réalisée grâce à des mesures psychrométriques.

Le principe d'un micropsychromètre est basé sur la mesure de la différence de température entre la température de l'air et la température de rosée à l'intérieur d'une chambre contenant les tissus dont on

veut mesurer le potentiel hydrique.

Il s'agit d'une mesure assez sophistiquée, jusqu'alors essentiellement utilisée en conditions contrôlées en laboratoire. Son utilisation *in situ* est récente et encore peu répandue. Une première étude au vignoble a été réalisée par Hessdorfer *et al.* (2013) mettant en évidence une corrélation entre les potentiels hydriques de base et de tige mesurés par la chambre à pression et le potentiel hydrique mesuré en continu par le psychromètre (respectivement $r^2 = 0,69$ et $0,82$).

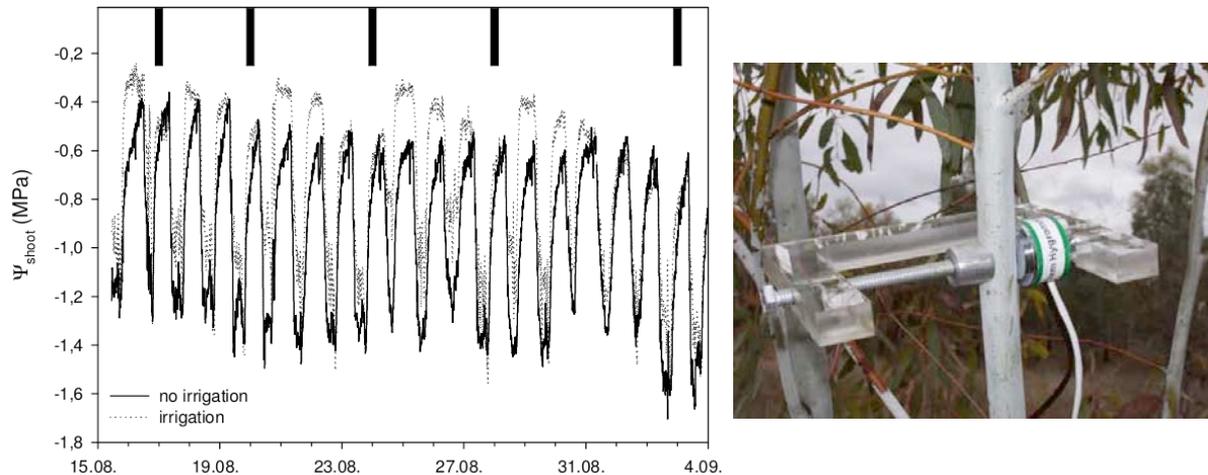


Figure 10 : A gauche : Variation du potentiel de tige sur Silvaner du 15 août au 4 septembre 2012. Les potentiels hydriques représentent la moyenne de 2 capteurs pour chaque traitement. Les barres noires indiquent des irrigations de 8 litres par plante (d'après Hessdörfer *et al.*, 2013). A droite : Photo d'un psychromètre (crédit photo : ICT International).

Des capteurs à installer sur plantes *in situ* sont commercialisés par la société ICT International. Leur coût et les difficultés d'installation les restreignent pour l'instant au domaine de l'expérimentation et de la recherche.

Extrapolation spatiale de l'état hydrique de la vigne

L'état hydrique de la vigne peut être très variable au niveau intra-parcellaire (van Leeuwen *et al.*, 2006), au niveau du vignoble (Taylor *et al.*, 2010) et bien sûr au niveau d'une appellation entière (Baralon *et al.*, 2012). Dans ce contexte, le caractère ponctuel des données acquises par les méthodes précédemment évoquées ne permet pas de fournir une information pertinente sur l'ensemble de la zone d'intérêt. La prise en compte de la variabilité spatiale de l'état hydrique de la vigne est alors nécessaire pour extrapoler ces informations.

Des méthodes de suivi spatial de l'état hydrique de la vigne ont été proposées (Acevedo-Opazo *et al.*, 2008). Elles sont basées sur des modèles spatiaux empiriques qui consistent à extrapoler une valeur de Ψ de référence $\Psi(s_{re}, t)$ mesurée sur un site de référence s_{re} au temps t . L'extrapolation est basée sur une relation linéaire définie par les coefficients a_s dont les valeurs sont spécifiques au site s (équation 1). En supposant les conditions climatiques homogènes sur la zone d'étude, cette relation permet de modéliser un phénomène assez intuitif ; lorsque la contrainte hydrique augmente sur un site, elle augmente également sur les sites voisins. Toutefois, cette augmentation peut être plus ou moins importante en fonction des conditions pédologiques, de conduite, etc. du site considéré. Il en résulte que relativement à un site de référence, l'augmentation plus ou moins importante de la contrainte hydrique d'un site quelconque de la zone d'étude est représentée par un coefficient (a_s).

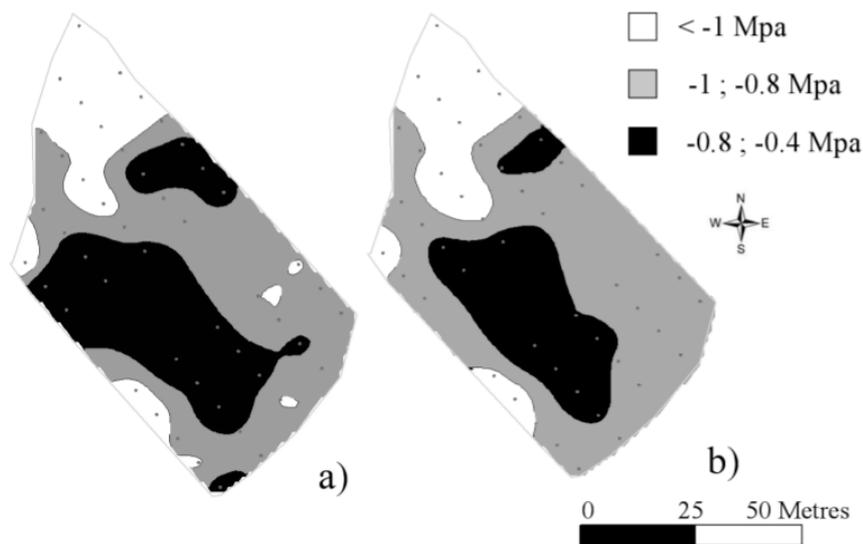


Figure 11 : Cartes de l'état hydrique en fin d'été (potentiel hydrique de base) : a) carte issue des mesures réalisées par chambre à pression sur 49 sites. b) Carte estimée à partir du modèle de l'équation 1 (d'après Acevedo-Opazo *et al.*, 2008).

$$\Psi(s,t) = a_s \cdot \Psi(s_{re},t) \text{ [eq.1]}$$

Le modèle donne une estimation de $\Psi(s,t)$ des valeurs de Ψ sur tout site s où un coefficient a_s est connu. Ce modèle spatial a été testé avec succès au niveau intra-parcellaire (Acevedo-Opazo *et al.*, 2010a) et au niveau d'un vignoble constitué de plusieurs parcelles (Taylor *et al.*, 2011). Plus récemment, le modèle a été testé avec succès à l'échelle d'une appellation par Baralon *et al.* (2012). A cette échelle, l'approche a été appelée SPIDER (SPatial extrapolation of the vine water status at the whole DEnomination scale from a Reference site). À l'échelle de l'appellation, SPIDER s'est avéré être plus précis dans l'estimation des valeurs de Ψ qu'une approche classique basée sur la moyenne des valeurs de Ψ échantillonnées sur le domaine. A cette échelle, SPIDER peut être d'un intérêt particulier en tant qu'outil d'aide à la décision pour la sélection parcellaire basée sur la contrainte hydrique subie par les vignes (Reynard *et al.*, 2011) ou pour identifier les zones où l'irrigation est la plus nécessaire. Cependant, tel que décrit par Baralon *et al.* (2012), l'application de SPIDER à grande échelle a soulevé certaines limites pratiques, dont la plus importante est la résolution spatiale qu'il est possible d'obtenir avec une telle approche. En effet, la résolution spatiale du modèle est limitée par le nombre de sites pour lesquels les coefficients a_s sont connus. La détermination des valeurs a_s requiert le suivi de Ψ sur plusieurs dates pour chaque site s . Considérant que les mesures de Ψ sont lourdes et leur coût prohibitif, cette contrainte pratique limite nécessairement le nombre de mesures et la résolution spatiale résultant du modèle. Une possibilité pour surmonter cette limite est d'utiliser des données auxiliaires liées à l'état hydrique de la vigne et disponibles à une résolution spatiale moyenne ou élevée. Au niveau intra-parcellaire et en conditions méditerranéennes, Acevedo-Opazo *et al.* (2010b) ont proposé avec succès, l'utilisation de données auxiliaires comme la surface foliaire exposée ou l'indice de végétation NDVI (Rouse *et al.*, 1973) à partir d'images aériennes multispectrales pour améliorer la résolution spatiale du modèle. Cependant, à l'échelle de l'appellation, ces données auxiliaires sont difficiles à mettre en œuvre car elles peuvent être affectées par les caractéristiques de la parcelle, comme la densité de plantation, le palissage, le système de conduite, etc. (Taylor *et al.*, 2011). Par conséquent, à cette échelle de travail, la variabilité de ces données auxiliaires peut ne pas être liée uniquement à la variabilité spatiale de l'état hydrique de la vigne et donc peut ne pas être pertinente pour effectuer l'extrapolation de Ψ .

Plus récemment, Herrero-Langreo *et al.*, (2013) ont proposé avec succès l'utilisation de la discrimination isotopique du carbone (appelée ci-après $\delta^{13}\text{C}$) comme données auxiliaires pour extrapoler les valeurs de Ψ au niveau intra-parcellaire. Le $\delta^{13}\text{C}$ fournit une mesure intégrative de la restriction en eau pendant la maturation du raisin (Gaudillère *et al.*, 2002). Le modèle empirique proposé par Herrero-Langreo *et al.*, (2013) est dérivé de l'approche proposée par Acevedo-Opazo *et al.*, (2010a) (Equation 2).

$$\Psi(s,t) = [b_0 + b_1 \cdot \delta^{13}\text{C}(s)] \cdot \Psi(s_{re},t) \text{ [eq.2]}$$

De même que pour l'équation 1, le principe du modèle consiste à extrapoler une valeur de Ψ à partir d'une mesure, $\Psi(s_{re},t)$, effectuée sur un site de référence s_{re} au temps t . L'extrapolation est effectuée en utilisant une fonction linéaire définie par deux coefficients (b_0 et b_1), qui se rapportent aux valeurs Ψ de $\delta^{13}\text{C}$ sur chaque site s ($\delta^{13}\text{C}(s)$) du domaine spatial considéré. Par conséquent, cette approche fournit une estimation $\Psi(s,t)$, pour tout site s où une valeur de $\delta^{13}\text{C}$ est disponible.

Par rapport à SPIDER, l'approche proposée par Herrero-Langreo *et al.* (2013) présente deux avantages pratiques majeurs. Tout d'abord, son étalonnage est moins contraignant et moins coûteux car le modèle nécessite la détermination de seulement deux paramètres (b_0 et b_1) à l'échelle de toute l'appellation. Par conséquent, en théorie, l'étalonnage requiert de suivre Ψ uniquement sur deux sites (en plus du site de référence). Cela réduit considérablement le nombre de mesures de Ψ nécessaires pour étalonner le modèle. D'autre part, la résolution spatiale de l'estimation de Ψ peut être améliorée très facilement puisqu'elle ne dépend que de la résolution spatiale à laquelle les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont disponibles. L'estimation de l'état hydrique de la vigne par le $\delta^{13}\text{C}$ est réalisée sur le jus de raisin échantillonné juste avant la maturité. Les échantillons peuvent être congelés pour une analyse ultérieure. Contrairement à la mesure directe de Ψ , la mesure de $\delta^{13}\text{C}$ est moins soumise à des contraintes de temps. Le seul facteur limitant le nombre de mesures est le coût de l'analyse et le temps nécessaire pour prélever et préparer les échantillons. Par conséquent, le $\delta^{13}\text{C}$ permet de prélever un nombre significatif d'échantillons sur une grande surface. À l'échelle de l'appellation, le $\delta^{13}\text{C}$ a récemment été utilisé avec succès (Martinez-Vergara *et al.*, 2014) pour extrapoler spatialement les valeurs de Ψ selon l'approche proposée par Herrero-Langreo *et al.* (2013).

Conclusion

Le pilotage de l'irrigation se base de préférence sur une mesure directe de l'état hydrique de la plante. Plusieurs méthodes sont disponibles pour accéder à cette information. Les méthodes manuelles demandent à l'opérateur de venir sur le terrain à fréquence répétée, limitant leur résolution temporelle. Ces mêmes méthodes requièrent généralement un échantillonnage au niveau des feuilles impliquant une multiplication des mesures de façon à capturer la variabilité de la canopée. Il est aussi possible de suivre en continu l'état hydrique de la vigne grâce à des capteurs qui s'installent sur la plante. Couplés à des systèmes de transmission sans fil de l'information, ces méthodes peuvent s'intégrer à des systèmes d'information donnant accès à distance et en instantané à l'état hydrique du vignoble. Le pilotage de l'irrigation peut alors se faire en continu. Néanmoins, l'installation de ces capteurs sur la vigne est souvent délicate et un contrôle ou une maintenance sur site peuvent être nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du dispositif et la qualité de la mesure. Certaines techniques sont d'ores et déjà utilisées en situations commerciales pour piloter l'irrigation. Toutefois, leur adoption est encore récente et ne concerne qu'un nombre limité de producteurs. De plus, notons que sur les dix dernières années, peu d'avancées ont été réalisées sur les capteurs - exception faite de l'imagerie infrarouge thermique. Des efforts en terme de transfert, d'optimisation des outils actuels ou de conception de nouveaux outils restent à faire.

Ces méthodes qu'elles soient ponctuelles ou continues sont lourdes et coûteuses à déployer à l'échelle

de la parcelle ou de l'exploitation. Des modèles d'extrapolation spatiale de l'état hydrique ont été développés et testés avec succès à l'échelle de la parcelle ou de l'appellation. Le couplage des approches « mesure directe de l'état hydrique de la plante » et « modèles d'extrapolation spatiale » à partir de données à moyenne voire haute résolution rend envisageable le pilotage précis de l'irrigation à différentes échelles malgré une grande variabilité spatiale de l'état hydrique. Pour optimiser ce couplage, des travaux sont à réaliser afin de guider l'utilisateur dans le choix de la plante 'représentative' ainsi que dans le choix de la zone représentative de la parcelle ou du domaine. On voit ici l'intérêt des données à haute résolution spatiale (directement ou indirectement) liées à l'état hydrique de la plante pour définir des zones d'état hydrique représentatives permettant de mieux raisonner le positionnement des capteurs. Notons toutefois que compte tenu du caractère récent de ces données, il n'existe pas de méthode opérationnelle disponible pour effectuer ce choix.

La télédétection peut fournir une variété de données utiles pour ce type d'application mais présente également des limites. Le multi-spectral qui permet de définir des zones de fonctionnement hydrique homogène suppose que le facteur limitant qui affecte la grandeur mesurée (indice de végétation) soit l'eau. Cette condition a pu être vérifiée dans certains vignobles non-irrigués du bassin méditerranéen où la contrainte hydrique est particulièrement marquée. Elle n'a pas pu être vérifiée dans d'autres vignobles plus septentrionaux. Une amélioration significative est l'utilisation de l'imagerie thermique à partir d'avion et/ou de drones. Malgré les recherches actives dans ce domaine, il n'existe encore aucun produit commercial opérationnel. La commercialisation de tels services soulèvera naturellement la question de leur coût, surtout s'ils nécessitent des passages d'avions (ou de drones) répétés au cours de la saison.

Références bibliographiques

- Acevedo-Opazo C., Tisseyre B., Ojeda H., Ortega Farias S., Guillaume S., 2008. Is it possible to assess the spatial variability of vine water status? *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 42, 203-219.
- Acevedo-Opazo C., Tisseyre B., Ojeda H., Guillaume S., 2010a. Spatial extrapolation of the vine (*Vitis vinifera* L.) water status: a first step towards a spatial prediction model. *Irrigation Science*, 28, 143-155.
- Acevedo-Opazo C., Tisseyre B., Taylor J., Ojeda H., Guillaume S., 2010b. A model for the spatial prediction of water status in vines (*Vitis vinifera* L.) using high resolution ancillary information. *Precision Agriculture*, 11, 358-378.
- Allen R.G., Pereira R.S., Raes D., Smith M., 1998. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrigation and Drainage. FAO, Roma, p. 56.
- Améglio T., Archer P., Cohen M., Valancogne C., Daudet, FA., Dayau S., Cruziat P., 1999. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil*, 207, 155-167.
- 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) *Irrig Sci* 30, 511–522.
- Baralon K., Payan J.C., Salancon E., Tisseyre B., 2012. SPIDER: SPatial extrapolation of the vine water status at the whole DENomination scale from a Reference site. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 46, 167-175.
- Braun P., Schmid J., 1999. Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.) 2. Granier measurements. *Plant Soil* 215, 47–55.
- Burgess S.S.O., Adams M.A., Turner N.C., Beverly C.R., Ong C.K., Khan A.A.H., Bleby T.M., 2001. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiol* 21, 589-598.

- Choné X., Van Leeuwen C., Dubourdiou D., Gaudillère J. P., 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany* 87, 477-483.
- Cohen Y., Fuchs M., Green G.C., 1981. Improvement of the heat-pulse method for determining sap flow in trees. *Plant Cell Environ* 4, 391-397.
- Costa J.M., Grant O.M., Chaves M.M., 2010. Use of thermal imaging in viticulture: current application and future prospects. In *Methodologies and Results in Grapevine Research*. Springer Netherlands, pp. 135-150.
- Daudet F.A., Améglio T., Cochard H., Archilla O., Lacoïnte A., 2005. Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany* 56, 135–144.
- Doltra J., Oncins J.A., Bonanay J., Cohen M., 2007. Evaluation of plant-based water status indicators in mature apple trees under field conditions. *Irrigation Science* 25, 351–359.
- Escalona J.M., Flexas J., Medrano H., 2002. Drought effects on water flow, photosynthesis and growth of potted grapevines. *Vitis* 41, 57–62.
- Fereres E., Goldhamer D., Cohen M., Girona J., Marta M., 1999. Continuous trunk diameter recording is a sensitive indicator for irrigation of peach. *Calc. Agric.* 53, 4, 21–25.
- Fereres E., Goldhamer D.A., 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 78, 2, 139–144.
- Fernandez J.E., Green S.R., Caspari H.W., Diaz-Espejo A., Cuevas M.V., 2008a. The use of sap flow measurements for scheduling irrigation in olive, apple and Asian pear trees and in grapevines. *Plant and Soil* 305, 91–104.
- Ferreira M.I., Silvestre J., Conceição N. and Malheiro A.C., 2012. Crop and stress coefficients in rainfed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques. *Irrig Sci*, 30, 433–447.
- 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, 757-763.
- Ginestar C., Eastham J., Gray S., Iland P., 1998. Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. I. Effects of post-veraison water deficits on water relations, vine growth, and yield of Shiraz grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* 49, 413–420.
- Girona J., Mata M., Del Campo J., Arbonés A., Bartra E., Marsal, J., 2006. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrigation Science*, 24, 115-127.
- Granier A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 42 (2), 193-200.
- Grant O.M., Tronina Ł., Jones H. G., Chaves M.M., 2007. Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. *Journal of Experimental Botany*, 58(4), 815-825.
- Green S.R., 1998. Flow by the heat-pulse method. *HortResearch Internal Rep*, 1998/22. HortResearch, Palmerston North, New Zealand.
- Grime V.L., Sinclair F.L., 1999. Sources of errors in stem heat balance sap flow measurements. *Agric. For. Meteorol.* 94, 103–121.
- Gutiérrez M.V., Harrington R.A., Meinzer F.C., Fownes J.C., 1994. The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. *Tree Physiology* 14, 179-190.
- Herrero-Langreo A., Tisseyre B., Goutouly J.P., Scholasch T., Van Leeuwen C., 2013. Mapping grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status during the season using carbon isotope ratio ($\delta^{13}C$) as ancillary data. *American Journal of Enology and Viticulture* 64, 307-315.
- Hessdörfer D., Scwab A.B., Gruber B.R., 2013. Continuous measurement of grapevine water status in an irrigated vineyard under changing weather conditions. *Proceedings of the 18th International Symposium Giesco, Porto, Portugal, 7-11 juillet 2013*.
- Hoang T., Maton L., Caballero Y., Rinaudo J.D., 2012. Impact du changement climatique sur le besoin en eau d'irrigation dans l'Ouest de l'Hérault. *Rapport Brgm RP-61311-FR*. 36 pages + 2 annexes.

- Idso S.B., Reginato R.J., Jackson R.D., Pinter Jr P.J., 1981. Measuring yield-reducing plant water potential depressions in wheat by infrared thermometry. *Irrigation Science* 2, 205-212.
- Intrigliolo D.S., Castel J.R., 2007. Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations. *Irrigation Sci.* 26, 49-59.
- Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J., Pinter P.J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water resources research* 17, 1133-1138.
- Jones H.G., 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology* 95, 139–149.
- Jones H.G., Stoll M., Santos T., De Sousa C., Chaves M.M., Grant O.M., 2002. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany* 53(378), 2249-2260.
- Jones H.G., Leinonen I., 2003. Thermal imaging for the study of plant water relations. *J. Agric. Meteorol.* 59, 205–217.
- Jones H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55 (407), 2427-2436.
- Lascano R.J., Baumhardt R.L., Lipe W.N., 1992. Measurements of water flow in young grapevines using the stem heat balance method. *Am. J. Enol. Vitic.*,43, 159-165.
- Lebon E., Garcia de Cortazar-Atauri I., 2014. Dans un contexte de changement climatique, quels sont les impacts de la sécheresse sur la vigne et sur le devenir des vignobles ? L'exemple du Languedoc. *Innovations Agronomiques* 38, 1-12.
- Lespinas F., Ludwig W., Heussner S., 2010. Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France. *Climatic Change* 99, 425-456.
- Martinez-Vergara A., Payan J.C., Salançon E., Tisseyre B., 2014. SPIDER δ : an empirical method to extrapolate grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status at the whole denomination scale using $\delta^{13}C$ as ancillary data. *Journal international des sciences de la vigne et du vin.* 48, 129-140.
- Möller M., Alchanatis V., Cohen Y., Meron M., Tsipris J., Naor A., Ostrovsky V., Sprintsin M., 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.
- Montoro A., López Urrea R., Mañas F., López Fuster P., Fereres, E., 2011. Dendrometric measurements in grapevine (*Vitis Vinifera* L. 'Tempranillo' and 'Cabernet Sauvignon') under regulated deficit irrigation. *Acta Hort. (ISHS)* 889, 113-122.
- Moriana A., Corell M., Girón I.F., Conejero W., Morales D., Torrecillas A., Moreno F., 2013. Regulated deficit irrigation based on threshold values of trunk diameter fluctuation indicators in table olive trees. *Scientia Horticulturae* 164, 102–111.
- Naor A., Cohen S., 2003. Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential and transpiration rate in response to withholding irrigation from field-grown apple trees. *HortScience* 38, 547–551.
- 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.
- Ortuño M.F., Conejero W., Moreno F., Moriana A., Intrigliolo D.S., Biel C., Mellisho C.D., Pérez-Pastor A., Domingo R., Ruiz-Sanchez M.C., Casadesus J., Bonany J., Torrecillas A., 2010. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management* 97, 1–11.
- Peacock B., Williams L.E., Christensen L.P., 2000. Water management and irrigation scheduling. *Raisin Production in California*. University of California Division of Agricultural and Natural Resources, 127-133.
- Pellegrino A., Lebon E., Voltz M., Wery J., 2005. Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant and Soil* 266, 129-142.
- 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.
- Reynard J.S., Zufferey V., Nicol G.-C., Murisier F., 2011. Vine water status as a parameter of the « terroir » effect under the non-irrigated conditions of the Vaud viticultural area (Switzerland). *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 45, 139-147.
- Rodriguez-Lovelle B., Trambouze W., Jacquet O., 2009. Evaluation de l'état de croissance végétative de la vigne par la « méthode des apex ». *Progrès Agricole et Viticole* 126 (4), 77-88.
- Rouse J.W. Jr., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceedings of the 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 vol. 1. US Government Printing Office, Washington DC*, pp. 309-317.
- Sakuratani T., 1981. A heat balance method for measuring water flow in the stem of intact plant. *Journal of Agricultural Meteorology* 37, 9-17.
- Scholander P.F., Hammel H.T., Brandstreet E.T., Hemmingsen E.A., 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148, 339-346.
- Schultz H.R., 1995. Water relations and photosynthetic responses of two grapevine cultivars of different geographical origin during water stress. *Strategies to Optimize Wine Grape Quality* 427, 251-266.
- Simonneau T., Ollat N., Pellegrino A., Lebon E., 2014. Contrôle de l'état hydrique dans la plante et réponses physiologiques de la vigne à la contrainte hydrique. *Innovations Agronomiques* 38, 13-32.
- Steinberg S.L., Van Bavel C.H.M., McFarland M.J., 1989. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114, 466-472.
- Swanson R.H., Whitfield D.W.A., 1981. A numerical analysis of heat-pulse velocity theory and practice. *J. Exp. Bot.* 32, 221-239.
- Taylor J., Acevedo-Opazo C., Ojeda H., Tisseyre B., 2010. Identification and significance of sources of spatial variation in grapevine water status. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16 (1), 218-226.
- Taylor J., Acevedo-Opazo C., Guillaume S., Ojeda H., Tisseyre B., 2011. A comment on inter-field spatial extrapolation of vine (*Vitis vinifera* L.) water status, *Journal international des sciences de la vigne et du vin* 45, 2, 121-124.
- Valancogne C., Nasr Z., 1989. Une méthode de mesure du débit de sève brute dans de petits arbres par bilan de chaleur. *Agronomie* 9 (6), 609-617.
- Van Leeuwen C., Lerich O., Renard R., Tregoat O., Alla P.-L., 2000. Micromorphometric changes in trunk diameter in relation to mild water stress in field grown vines. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 34, 41-47.
- Van Leeuwen C., Goutouly J.-P., Azaïs C., Costa Ferreira A.-M., Marguerit E., Roby J. P., Choné X., Germain C., Homayouni S., Gaudillere J.-P., 2006. Intra-block variations of vine water status in time and space. *Vith International Terroir Congress (2-7 July 2006)*, ENITA de Bordeaux – Syndicat Viticole des Coteaux du Languedoc, France, 64-69.
- Velez J.E., Intrigliolo D.S., Castel J.R., 2007. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agricultural Water Management* 90, 197-204.
- Williams L.E., Araujo F.J., 2002. Correlations among predawn leaf, midday leaf, and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in *Vitis vinifera*. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 127, 448-454.
- Williams L.E., Ayars J.E., 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 132(3), 201-211.
- Yunusa I.A.M., Walker R.R., Lovey B.R., Blackmore D.H., 2000. Determination of transpiration in irrigated grapevines : comparison of heat-pulse technique with gravimetric and micrometeorological methods. *Irrigation Sci* 20, 1-8.