

Appréciation de l'alimentation hydrique de la vigne dans divers terroirs viticoles vaudois (Suisse)

Estimation of plant hydraulics of grapevine in various « terroirs » in the Canton of Vaud (Switzerland)

Vivian ZUFFEREY* et François MURISIER

Agroscope Changins-Wädenswil ACW, Centre viticole du Caudoz
Avenue Rochettaz 21, 1009 Pully, Suisse

Corresponding author: +41 (0)21 721 15 62, vivian.zufferey@rac.admin.ch

Abstract: The study of the physiological behaviour of the grapevine (cv. Chasselas), and of plant hydraulics in particular, was conducted on various « terroirs » in the Canton of Vaud (Switzerland) between 2001 and 2003 by Agroscope Changins-Wädenswil ACW, in collaboration with the firm I. Letessier (SIGALES) in Grenoble and the Federal Polytechnic School of Lausanne (EPFL). An evaluation of the vine plant hydraulics was made by means of physiological indicators (leaf and stem water potentials, transpiration and leaf stomatal conductance, carbon isotope discrimination and a model of transpirable soil water), in relation to estimations of the soil water reservoir and climatic factors. A close relationship came to light between the plant hydraulics, estimated by the pre-dawn leaf water potential, and the reserves of useful soil water (RU), from a network of about 30 study sites over a period of observation covering three climatically different years (2001 very wet year, 2002 intermediate year, and 2003 dry year). The study showed that measurement of the minimum stem water potential, carried out when evaporation was at its highest during the day, was able to account for momentary water stress. Observations from the present study indicate that the carbon isotope discrimination technique (ΔC_{13}) in grape sugars was closely correlated to the plant hydraulics noted in the vine during the ripening stage (phase of sugar accumulation in berries). The use of a transpirable soil water model (Riou and Payan, 2001; Lebon *et al.*, 2003) allowed the levels of water stress from the different sites to be determined according to the three principal components: precocity, duration and intensity. The total of transpirable soil water (TTSW) was estimated by combining the model with values of pre-dawn leaf water potential. The estimations of TTSW and RU observed at the different study sites were in good agreement.

Key words : « terroir », plant hydraulics, leaf and stem water potential, carbon isotope

Introduction

Des études de caractérisation des terroirs viticoles tendent à montrer l'influence prépondérante des conditions d'alimentation en eau sur le comportement de la vigne et la qualité des raisins et des vins (Seguin, 1970; Morlat, 1989; van Leeuwen, 1991). De manière générale, l'alimentation hydrique de la vigne durant la maturation des raisins constitue un des facteurs clés de la qualité de la vendange, unanimement reconnu (Deloire *et al.*, 2003). Par ailleurs, la sensibilité de la vigne au déficit hydrique est fonction de facteurs intrinsèques à la parcelle (nature du sol, mésoclimat) et varie selon les facteurs génétiques et agronomiques.

Il existe de nombreuses techniques pour évaluer le régime hydrique de la vigne (van Leeuwen *et al.*, 2001) : certaines sont basées sur l'appréciation de la quantité d'eau dans le sol (gravimétrie ou humidité à neutrons) ou sa disponibilité pour la plante. Les indicateurs physiologiques constituent une approche complémentaire en évaluant l'état hydrique de la plante elle-même. Certaines mesures mettent en lumière l'état hydrique instantané de la vigne telle que la mesure de la transpiration du feuillage ou celle des potentiels hydriques foliaires. Quelques techniques font apparaître des paramètres méso- ou microclimatiques comme le bilan hydrique théorique ou le « crop water stress index »; d'autres encore permettent d'évaluer globalement le régime hydrique de la vigne durant la maturation du raisin (phase d'accumulation des sucres) à partir du rapport isotopique $^{13}C/^{12}C$ dans les sucres des moûts.

Dans la présente étude, nous avons cherché à évaluer la pertinence de plusieurs indicateurs physiologiques de la contrainte hydrique (potentiels hydriques foliaires, échanges gazeux du feuillage, discrimination isotopique du carbone et modèle de bilan hydrique) sur une trentaine de sites dont la réserve en eau des sols variait de 50 mm à plus de 250 mm. Cette présentation fait partie d'une étude plus large menée sur les relations hydriques sol-climat-plante et leur incidence sur la qualité des raisins et des vins.

Matériel et méthodes

Caractéristiques pédologiques et climatiques

Types de sols

L'étude des sols a permis d'opérer des regroupements par types et d'élaborer une première cartographie des entités pédologiques (Letessier et Fermond, 2004). La grande majorité des sols, soit environ 80% de la superficie des zones étudiées, est issue de la moraine alpine, mélange de débris indifférenciés de toutes tailles transportés par le glacier du Rhône. Les moraines peuvent être classées en trois types de roches-mères (Letessier et Fermond, 2004) : les **moraines latérales** caillouteuses (30-60% d'éléments grossiers siliceux et calcaires), les **moraines de fond** peu caillouteuses (< 30% d'éléments grossiers) et les **moraines de retrait** et/ou de formation fluvio-glaciaires (peyrosols) gravelo-caillouteuses (> 60% d'éléments grossiers). On observe, à certains endroits, une moraine peu épaisse sur la molasse gréso-sableuse ou marneuse, ou sur le calcaire gréseux du Jura, parfois de moins de 60 cm d'épaisseur. Quelques colluvions observées dans les bas de pente sont issues de l'érosion progressive des pentes dominantes.

Réserve hydrique des sols (RU)

La réserve en eau du sol (RU) a été estimée par tranches de 10 cm de sol (réserve décimétrique) dans les profils pédologiques en tenant compte de la texture, de la quantité d'éléments grossiers et de la colonisation racinaire. Les estimations de RU ont été effectuées par Letessier et Fermond (2004) qui ont ainsi évalué le profil hydrique ou la quantité d'eau directement utilisable par la vigne dans les différents sites de l'étude.

Caractéristiques climatiques des années 2001 à 2003

L'année 2001 a été caractérisée par une pluviométrie importante (1 248 mm à Changins pour une moyenne pluriannuelle de 945 mm et 1 565 mm à Pully pour une moyenne de 1 100 mm). Du mois de janvier à la fin du mois de juin, les précipitations ont été particulièrement abondantes et les orages estivaux très réguliers. Sur le plan des températures, les mois de mai et août ont été particulièrement chauds avec des températures supérieures de 2,5 à 3 °C à la moyenne des trente ans. En 2002, la pluviométrie a été légèrement supérieure à la moyenne pluriannuelle, principalement durant la période végétative à Lavaux et dans le Chablais. Des précipitations faibles, mais fréquentes ont été observées durant la maturation du raisin dans ces deux régions également. Les vignobles à La Côte et à Bonvillars ont bénéficié d'un temps plus sec durant le mois de septembre. Les températures annuelles ont partout dépassé de 2 à 2,5 °C la moyenne des trente ans. Le mois de juin a été exceptionnellement chaud. Le bilan des températures mensuelles a présenté un solde positif durant la période de végétation. En 2003, les températures estivales ont été largement supérieures à la normale de 4 à 6,5 °C durant les mois de juin à août. La période estivale a également été caractérisée par de faibles précipitations et par un déficit hydrique important sur l'ensemble du réseau.

Dispositif expérimental

Un réseau d'une trentaine de parcelles a été mis en place dans les entités particulièrement importantes et caractéristiques du vignoble vaudois dans des zones pilotes recouvrant environ 1 000 ha. Les parcelles d'étude sont conduites avec du Chasselas greffé sur 3309C et menées en espalier (Guyot simple avec un plan de palissage vertical).

Mesures expérimentales

Régime hydrique de la vigne

La mesure des potentiels hydriques (Ψ) de la vigne a été effectuée au moyen de la chambre à pression ou bombe de Scholander (Scholander *et al.*, 1965). Le Ψ_{base} a été mesuré en fin de nuit (02h00 à 06h00) à l'obscurité complète sur des feuilles insérées dans la partie médiane du feuillage. L'échantillonnage a été constitué de huit feuilles par microparcelle issues de souches différentes. Le potentiel tige (Ψ_T) a été déterminé sur des feuilles ensachées (dans une feuille plastique doublée d'une feuille d'aluminium) au moins une à deux heures avant la mesure. Les mesures du potentiel de tige minimum ($\Psi_{T \text{ min}}$) ont été réalisées sur des feuilles adultes de rameaux principaux, insérées dans la partie médiane du feuillage, en milieu de journée (midi solaire), période durant laquelle la demande d'évaporation est la plus importante. Neuf feuilles par microparcelle ont formé l'échantillonnage. Des détails supplémentaires de mesures sont indiqués chez Zufferey et Murisier (2004).

Discrimination isotopique du carbone

La discrimination isotopique du carbone dans les sucres des raisins, appelée $\delta^{13}\text{C}$ ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) et exprimée en pour-mille, a été dosée sur un échantillon de moût obtenu à partir d'un prélèvement de trois cents baies à maturité par parcelle. L'échantillon (quelques millilitres) a été autoclavé, puis converti en CO_2 par combustion à l'aide de l'oxygène pur. Le contenu isotopique a été ensuite déterminé à l'aide d'un spectromètre de masse à flux continu (Europe Scientific Ltd., Crewe, UK, Avice *et al.*, 1996).

Modèle de bilan hydrique

Un modèle de bilan hydrique, développé par Riou et Payan (2001) et Lebon *et al.* (2003), a été testé sur l'ensemble des sites à l'étude. Ce modèle repose sur l'acquisition de données simples et accessibles caractérisant la parcelle sur les plans climatique et agronomique (précipitations, ETP, stades phénologiques, gabarit de la végétation). Le modèle considère le sol comme un réservoir qui se remplit grâce aux précipitations et se vide en fonction de la demande climatique. L'estimation de la quantité totale d'eau du sol utilisable par la vigne (TTSW) a été déterminée par couplage du modèle de bilan hydrique avec les valeurs du potentiel hydrique de base.

Résultats et discussion

Réserve hydrique des sols

L'étude des profils racinaires effectuée sur l'ensemble du réseau a permis de connaître la profondeur de sol exploré par les racines, la quantité et la nature des racines présentes, ainsi que d'apprécier la réserve utile en eau des sols (RU). La profondeur d'enracinement varie fortement en fonction du type de sol, de la compacité de la moraine et de la proximité de la molasse gréso-calcaire (marneuse) ou conglomératique. Inférieure à 80 cm lorsque la moraine est très compacte, la profondeur d'enracinement peut dépasser les 250 cm dans les moraines meubles de pente ou très caillouteuses (peyrosols). Les estimations de la RU des sols ont montré que le potentiel de réservoir hydrique s'est avéré très différent également d'un type de sol à l'autre en raison de leur texture, de la quantité d'éléments grossiers et de la profondeur d'enracinement très diverse. Dans notre réseau, les RU variaient de 50 mm à plus de 250 mm chez les plus importants réservoirs en eau.

Suivis du régime hydrique de la vigne : mesure du Ψ_{base}

Les figures 1 et 2 illustrent le suivi du Ψ_{base} de différentes parcelles à La Côte (fig. 1) et à Bonvillars (fig. 2) regroupées selon leur réservoir en eau. Il ressort de cette étude que les sites à forte RU (> 150 mm) n'ont présenté aucune contrainte hydrique durant les saisons 2001 et 2002 quel que soit le déficit hydrique cumulé durant l'année. Les parcelles à faible RU (< 100 mm) ont, par contre, subi en fin de cycle végétatif, des contraintes hydriques modérées, principalement en 2002, saison durant laquelle le déficit hydrique cumulé atteignait 220 mm à la fin de septembre à La Côte.

Si la réserve en eau des sols est limitée, l'évolution du Ψ_{base} est largement dépendante du déficit hydrique cumulé en cours de saison, c'est-à-dire du cumul des précipitations estivales et de l'évapotranspiration de la végétation et du sol. Les vignes dont la réserve en eau des sols se situe entre 100 et 150 mm, se sont trouvées dans une situation intermédiaire, affichant une contrainte hydrique faible durant les périodes de végétation 2001 et 2002.

La saison 2003 a été marquée par un déficit hydrique cumulé très élevé durant la période estivale, atteignant 400 mm à la fin août à La Côte et 320 mm à Bonvillars (fig. 1 et 2). Les vignes à forte RU (> 150 mm) ont subi un niveau modéré de contrainte hydrique au cours des mois de juillet et d'août. Les parcelles dont la RU se situe entre 100 et 150 mm se sont montrées un peu plus sensibles au déficit hydrique que les vignes à grand réservoir. La contrainte a été importante à la mi-août, puis modérée durant la maturation du raisin. Enfin, chez les vignes à faibles réservoirs en eau (RU < 100 mm), les niveaux de contrainte ont été modérés très tôt dans la saison (début juin) et importants durant les mois de juillet et août. La chute des feuilles dans la zone des grappes a été manifeste sur les sites à réservoir hydrique très restreint.

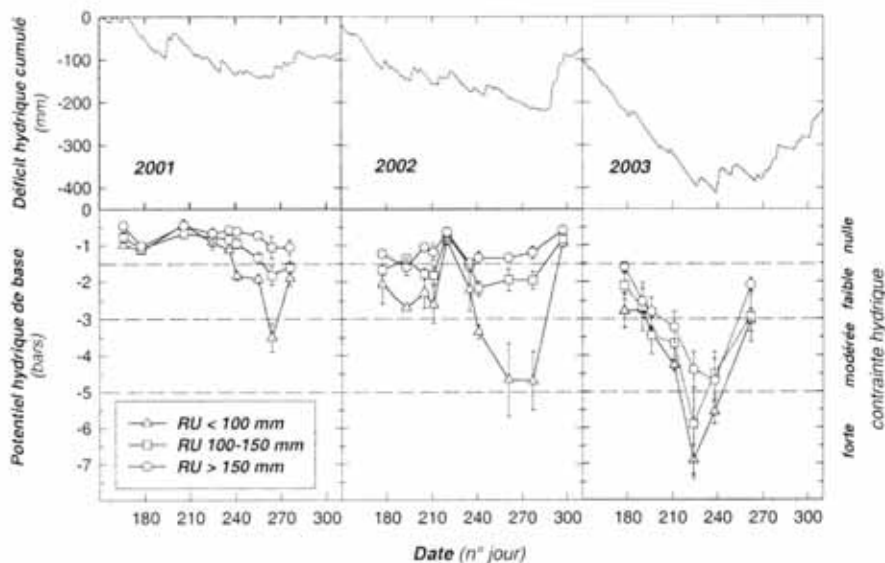


Figure 1 - Évolution du déficit hydrique potentiel (précipitations-ETP) et du potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) en relation avec la réserve utile en eau (RU) des sols.

Barres verticales : erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2001-2003.

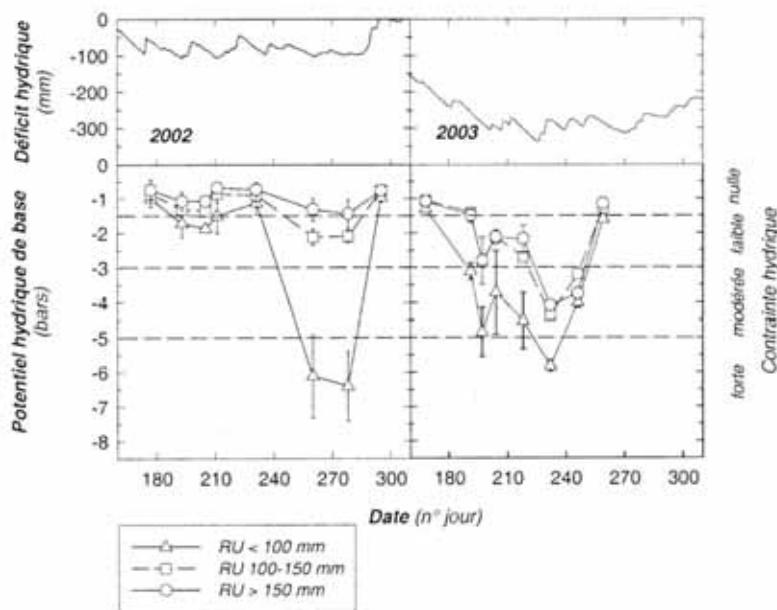


Fig. 2 - Évolution du déficit hydrique potentiel (précipitations-ETP) et du potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) au cours de la saison en relation avec la réserve utile en eau (RU) des sols.

Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002-2003.

Mesure du Ψ_T

Les valeurs du Ψ_T min enregistrées durant la période la plus chaude de la journée ont été systématiquement plus négatives chez les vignes implantées sur des sols à faible RU à Bonvillars (tableau 1). Cette technique de mesure a permis de mettre en évidence des variations de comportement de l'alimentation

RU (mm)	$\Psi_{\text{TIGE MIN}}$ (bars)				
	nouaison 1 juillet	Fermeture grappe 22 juillet	véraison 14 août	maturation 18 septembre	vendanges 2 octobre
RU < 70 mm	-6.6 ± 0.3	-5.4 ± 0.2	-4.6 ± 0.2	-16.5 ± 0.3	-13.4 ± 0.5
RU 90-100 mm	-4.4 ± 0.1	-4.5 ± 0.2	-3.3 ± 0.2	-11.1 ± 0.5	-11.0 ± 0.8
RU 100-140 mm	-4.3 ± 0.2	-4.7 ± 0.2	-3.5 ± 0.1	-	-6.0 ± 0.4
RU 150-190 mm	-3.5 ± 0.1	-3.7 ± 0.1	-3.2 ± 0.2	-	-
RU > 220 mm	-3.7 ± 0.1	-3.8 ± 0.1	-3.0 ± 0.2	-	-4.0 ± 0.2

Tableau 1 - Mesures du potentiel tige minimal ($\Psi_{\text{T MIN}}$) réalisées en cours de saison sur divers sites à RU différente.

Moyenne ± erreur standard. Chasselas, Bonvillars, (CH), 2002.

hydrique de la vigne lorsque la demande évaporatoire était la plus élevée, et ceci à une période du cycle végétatif durant laquelle aucune contrainte hydrique n'avait été relevée par la mesure du Ψ_{base} . Les premiers signes de défoliation (feuilles jaunies à la base des rameaux) ont été observés avec des valeurs de Ψ_T min proches de -11 bars. Ces résultats corroborent les observations réalisées par Choné (2001).

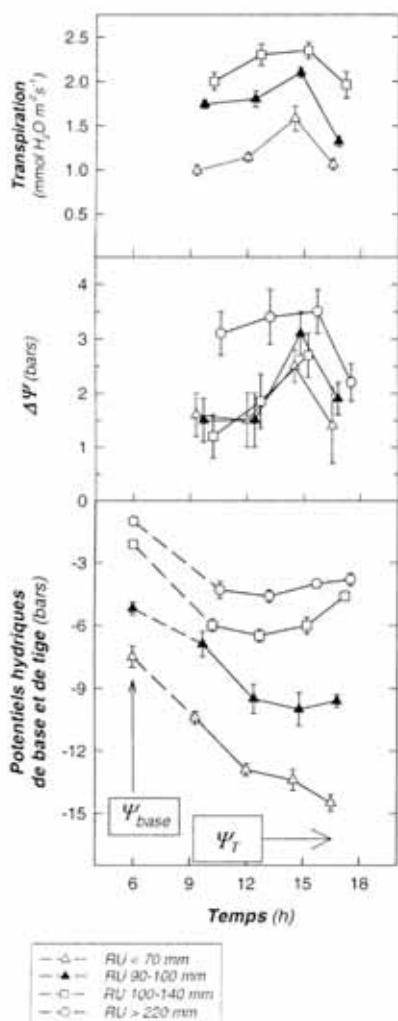


Figure 3 - Évolution journalière (02/10/2002) de la transpiration foliaire, du gradient de potentiel entre le Ψ_T et le Ψ_F ($\Delta \Psi$), et du potentiel tige (Ψ_T) sur 4 sites dont la RU est différente.

Barres verticales : erreur standard; belle journée ensoleillée, $^{\circ}C_{max}$: 19,8; humidité relative minimale dans l'après-midi : 52%. Chasselas, Bonvillars (CH).

Discrimination isotopique du carbone ($\delta^{13}C$)

La figure 5 montre que la discrimination isotopique du carbone ($\delta^{13}C$) dans les sucres des raisins à la vendange a été étroitement corrélée au régime hydrique observé sur la vigne durant la maturation (Ψ_{base} moyen mesuré à cinq reprises). Nos résultats confirment en tous points les observations faites par divers auteurs (Gaudillère *et al.*, 1999; Choné, 2001; van Leeuwen *et al.*, 2001). Une relation a également

L'évolution journalière du Ψ_T a reflété globalement le niveau de contrainte hydrique observé par les mesures du Ψ_{base} dans quatre sites présentant des RU diverses (fig. 3). Des valeurs extrêmement basses du Ψ_T enregistrées en fin d'après-midi sur le site à très faible RU témoignent d'une diminution de la disponibilité de l'eau dans le sol et d'une forte augmentation des résistances hydrauliques au transfert de l'eau depuis le sol jusqu'aux feuilles. La réduction de la transpiration foliaire et du gradient de potentiel hydrique entre le rameau et les feuilles ($\Delta \Psi$), observés sur cette même parcelle, traduisent une perte de conductivité hydraulique et une fermeture progressive des stomates. Diverses études ont par ailleurs montré l'existence de relations entre l'état de tension dans les conduits du xylème et le degré d'embolie (cavitation). L'apparition d'embolie chez la vigne a souvent été soupçonnée lors d'une contrainte hydrique sévère qui entraînerait, entre autre, l'arrêt de la croissance des apex et l'apparition des premiers signes de défoliation (Schultz et Matthews, 1988).

Nos observations menées sur différents sites durant les années 2001-2003 montrent qu'il existe une relation linéaire entre le Ψ_{base} et le Ψ_T min (fig. 4). La relation a été établie dans des conditions climatiques bien définies et comparables entre les sites concernant la mesure du Ψ_T min ($^{\circ}C$ de l'air comprise entre 25 et 32 $^{\circ}C$, humidité relative entre 35 et 50%, PAR > 1200 PPF, ETPj comprise entre 4,5 et 5,5 mm). Des observations supplémentaires s'avèrent toutefois nécessaires pour établir l'influence variétale et celle des conditions pédo-climatiques dans cette relation.

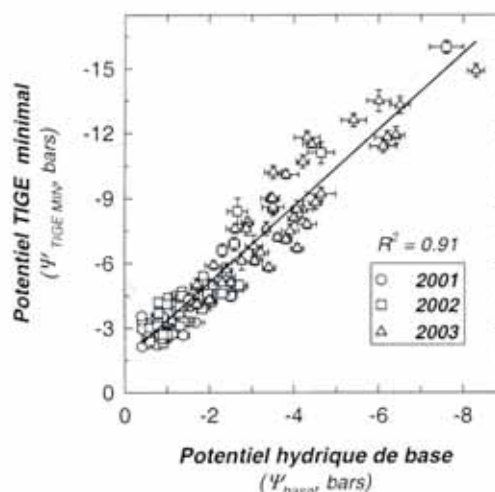


Figure 4 - Relation établie entre le potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) et le potentiel de tige minimal ($\Psi_{TIGE MIN}$) sur les différents sites à l'étude.

Barres verticales et horizontales : erreur standard; température de l'air comprise entre 25-32 $^{\circ}C$; humidité relative mesurée entre 35-50%; éclairage saturant PAR >1200 $\mu mol photons m^{-2}s^{-1}$; ETPj comprise entre 4,5 et 5,5 mm. Chasselas, Canton de Vaud (CH), 2001-2003.

pu être établie entre le $\Psi_{T \text{ min}}$ et le rapport $\delta^{13}\text{C}$ (résultats non présentés). Il est toutefois important de poursuivre les investigations concernant la fiabilité de cet indicateur pour différents cépages et diverses conditions pédo-climatiques.

Modèle de bilan hydrique

Une interprétation du modèle de bilan hydrique (Riou et Payan, 2001; Lebon *et al.*, 2003) a été réalisée sur différentes parcelles du réseau, afin de tester la pertinence et la validité de la méthodologie (fig. 6). Le paramétrage du modèle utilise la vigne comme indicateur de l'état hydrique du milieu à travers la mesure du Ψ_{base} . La figure 6 présente l'évolution de la fraction d'eau du sol utilisable par la plante (FTSW) en cours de saison sur une dizaine de parcelles à La Côte. Le bilan hydrique présente l'avantage de discriminer les niveaux de contrainte hydrique au travers de ses trois composantes que sont la précocité, la durée et l'intensité.

L'estimation de la TTSW (réserve hydrique maximale du sol, utilisable par la plante) effectuée grâce au bilan hydrique et aux mesures du Ψ_{base} a été comparée à celle de la RU proposée par les pédologues (Letessier et Fermond, 2004). Les premiers résultats montrent une bonne concordance entre l'estimation de la RU des sols et celle de la TTSW simulée durant la saison 2003, ainsi que sur la moyenne des saisons 2001-2003 (tableau 2). Les valeurs de TTSW sont en général un peu moins élevées que celles de la RU. Ces premières observations sont encourageantes et l'amélioration envisagée du modèle par la prise en compte de la transpiration de la culture intercalaire et des flux d'eau de ruissellement par exemple, permettra, sans aucun doute, d'accroître la fiabilité d'un tel outil de diagnostic de la contrainte hydrique.

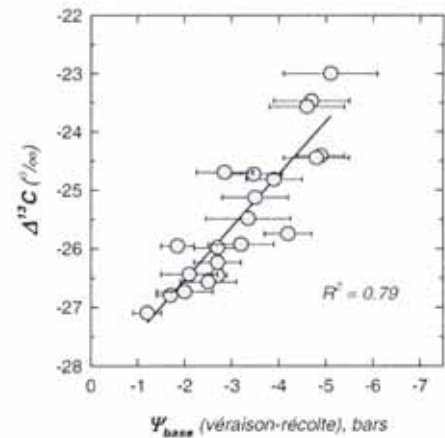


Figure 5 - Relation établie entre le rapport isotopique du C ($\delta^{13}\text{C}$) dans les sucres des moûts à la vendange et les valeurs du Ψ_{base} mesuré durant la période de la maturation à la récolte sur un réseau de 21 parcelles.

Barres horizontales : erreur standard. Chasselas, canton de Vaud (CH), 2003.

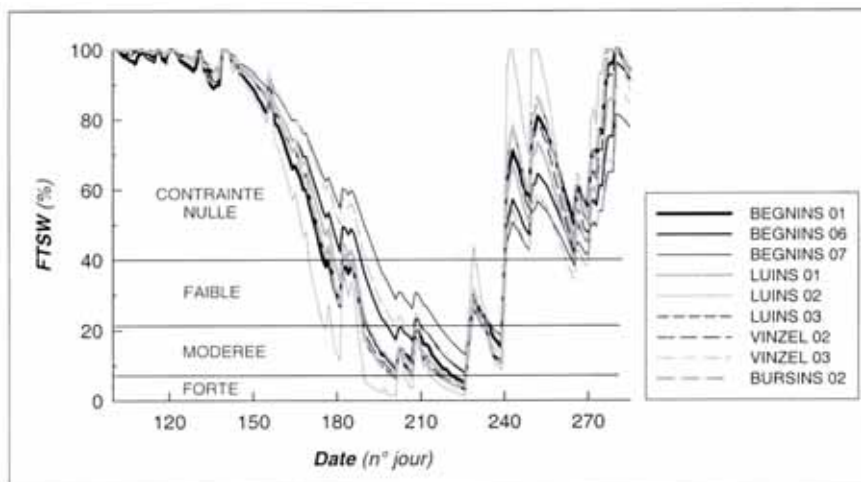


Figure 6 - Évolution de la FTSW (fraction d'eau du sol utilisable par la plante) en cours de saison 2003 sur différentes parcelles selon le modèle de bilan hydrique proposé par Riou et Payan (2001) et Lebon *et al.* (2003). Chasselas, La Côte (CH), 2003.

Parcelles	RU (mm)	TTSW (mm)	TTSW (mm)
		2003	φ 2001-2003
Begnins 01	150	120	125 ± 30
Begnins 06	160	150	165 ± 35
Begnins 07	>150	170	190 ± 40
Luins 01	115	130	110 ± 20
Luins 02	65	50	70 ± 25
Luins 03	80	90	100 ± 15
Vinzel 02	80	110	-
Vinzel 03	120	150	160 ± 30
Bursins 02	125	90	-
Dully 02	85	-	80 (en 2002)

Tableau 2 - Estimation de la réserve utile en eau des sols (RU) par Letessier et Fermond (2004) et de la quantité totale d'eau du sol utilisable par la plante (TTSW), simulée par le modèle du bilan hydrique (Riou et Payan, 2001; Lebon *et al.*, 2003) sur différents sites du réseau des terroirs viticoles vaudois.

Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2001-2003.

Références bibliographiques

- Avicé J., Ourry A., Lemaire G., Boucaud J. 1996. Nitrogen and carbon flows estimated by ¹⁵N and ¹³C pulse-chase labeling regrowth of alfalfa. *Plant physiol.*, **112**, 281-290.
- Chone X., 2001. Contribution à l'étude des terroirs de Bordeaux : Etude des déficits hydriques modérés, de l'alimentation en azote et de leurs effets sur le potentiel aromatique des raisins de *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon blanc. Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux 2. 188 p.
- Deloire A., Carbonneau A., Federspiel Brigitte, Ojeda H., Wang Z., Costanza P., 2003. La vigne et l'eau. *Le Progrès Agricole et Viticole*, **4**, 79-90.
- Gaudillère J.-P., van Leeuwen C., Ollat N., Goutouly F., Champagnol F., 1999. ¹³C/¹²C. Discrimination measured in tartrate and sugars in mature grapevine berries. *Acta Hort.* **493**, 63-68.
- Lebon E., Dumas V., Pieri Ph., Schultz H.-R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. CSIRO Publishing. *Functional Plant Biology*, **30**, 699-710.
- Letessier Isabelle, Fermond C., 2004. Étude des terroirs viticoles vaudois (Suisse), Géo-pédologie. Zone pilote de La Côte : Appellations Bursinel, Vinzel, Luins et Begnins. Rapports SIGALES, Études de sols et de terroirs, Letessier-Fermond, 38410 St Martin d'Uriage, 70 p.
- Morlat R., 1989. Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Application aux vignobles rouges de la moyenne vallée de la Loire. Thèse Doct. État, Bordeaux II, texte 289 p. + annexes.
- Riou C., Payan J.C., 2001. Outils de gestion de l'eau en vignoble méditerranéen. Application du bilan hydrique au diagnostic du stress hydrique de la vigne. Compte Rendu du GESCO. 12^{ème} journées, Montpellier 3 au 7 juillet 2001, 125- 133.
- Scholander P.F., Hammel H.T., Bradstreet E.D., Hemmingzen E.A., 1965. Sap Pressure in Vascular Plants. *Science*, **148**, 339-346.
- Schultz H.-R., Matthews M.A., 1988. Resistance to water transport in shoots of *Vitis vinifera* L. *Plant physiology*, **88**, 718-724.
- Seguin G., 1970. Les sols viticoles du Haut Médoc. Influence sur l'alimentation en eau de la vigne et sur la maturation du raisin. Thèse de doctorat de l'université de Bordeaux, institut d'œnologie, 141 p.
- Van Leeuwen C., 1991. Le vignoble de Saint-Emilion : Répartition des sols et fonctionnement hydrique, incidences sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin. Thèse Doct. Nouveau régime, Bordeaux II, 154 p.
- Van Leeuwen C., Gaudillère J.-P., Tregoat O., 2001. L'évaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique ¹³C/¹²C. L'intérêt de sa mesure sur les sucres du moût à maturité. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **35**, n°4, 195-205.
- Zufferey V., Murisier F., 2004. Étude des terroirs viticoles vaudois. Comportement de la vigne en fonction des conditions pédo-climatiques. Rapport final. Agroscope RAC Changins, Centre viticole du Caudoz, CH-1009 Pully, 221 p.