

Alimentation en eau et comportement du Pinot noir dans les conditions du Valais central

Vivian ZUFFEREY¹, Jean-Laurent SPRING¹, Thibaut VERDENAL¹, Ágnes DIENES-NAGY¹, Sandrine BELCHER¹, Fabrice LORENZINI¹, Carole KOESTEL¹, Johannes RÖSTI¹, Katia GINDRO¹, Jorge E. SPANGENBERG² et Olivier VIRET³
¹Agroscope Changins, 1260 Nyon, Suisse

²Université de Lausanne, Institut des dynamiques de la surface terrestre (IDYST), 1015 Lausanne, Suisse

³Service de l'agriculture et de la viticulture (SAVI), 1110 Morges, Suisse

Renseignements: Vivian Zufferey, e-mail: vivian.zufferey@agroscope.admin.ch, tél. +41 58 468 65 62, www.agroscope.ch



Essai d'irrigation mené au domaine expérimental d'Agroscope à Leytron sur Pinot noir.

Introduction

La vigne, originaire du bassin méditerranéen, est traditionnellement considérée comme une plante résistante à la sécheresse. Son aptitude à endurer un manque d'eau provient de sa grande capacité à explorer le sol en profondeur grâce à un système racinaire très développé. Par ailleurs, ses besoins en eau sont relativement

modestes en comparaison d'autres cultures (Pereira *et al.* 1998), la maîtrise des rendements et la limitation progressive et modérée de son alimentation en eau étant recherchées pour obtenir des vins de qualité (van Leeuwen and Seguin 1994).

La sensibilité de la vigne au déficit hydrique est fonction de facteurs liés à la parcelle (nature du sol et réserve en eau, méso-climat) et varie selon des fac-

teurs génétiques (couple cépage/porte-greffe) (Spring 1997) et agronomiques (entretien du sol, rapport feuille-fruit, irrigation, etc.), entre autres. De nombreuses études ont mis en évidence les effets d'une limitation de l'alimentation en eau chez la vigne sur les échanges gazeux du feuillage comme la photosynthèse et la transpiration foliaire, le développement végétatif et racinaire, la nutrition minérale des plantes et la durée du cycle végétatif (Spring et Zufferey 2009; Chaves *et al.* 2010).

Il est par ailleurs connu que l'intensité de la sécheresse, sa période d'apparition et sa durée influent sur la taille finale des baies (rendement) et sur leur composition (Deloire *et al.* 2004). Une contrainte hydrique modérée qui survient dès la véraison favorise généralement l'accumulation des sucres et augmente la teneur en anthocyanes et en tanins des baies de cépages rouges (Matthews et Anderson 1989). Sous des climats tempérés, des conditions de déficit hydrique sont favorables pour produire des vins rouges de grande qualité (van Leeuwen *et al.* 2009).

Pour étudier l'influence de l'alimentation en eau sur le comportement agronomique de la vigne et la qualité des raisins et des vins, un essai d'irrigation permettant de créer différents régimes hydriques de la vigne en cours de saison a été mis en place au domaine expérimental d'Agroscope à Leytron (Valais). Les effets de l'alimentation en eau sur les échanges gazeux du feuillage, la vigueur des rameaux, les composantes du rendement et la qualité des raisins et des vins de Pinot noir ont été analysés et les résultats présentés dans cet article.

Matériel et méthodes

L'expérimentation a été menée de 2009 à 2015 sur le domaine expérimental d'Agroscope à Leytron dans le Valais central. Le sol est très caillouteux et perméable, avec une réserve utile en eau (RU) estimée à environ 150 mm. Les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à près de 600 mm (tabl. 1). L'essai a été planté avec du Pinot noir (clone 9-18), greffé sur 5BB, en 1995. La vigne est conduite en Guyot simple (180x100 cm) en maintenant six rameaux par souche. Trois variantes ont été mises en place.

- A: variante irriguée au goutte-à-goutte de la floraison à la véraison (en général du 15 juin au 15 août). L'irrigation permet de compenser environ 30 % de l'évapotranspiration moyenne, calculée à partir d'une moyenne de vingt ans de la Station météorologique de Sion aérodrome (MétéoSuisse). L'apport d'eau, effectué de façon

Résumé ■ Un essai d'irrigation mené de 2009 à 2015 au domaine expérimental d'Agroscope à Leytron a permis de confirmer l'effet positif d'une contrainte hydrique modérée sur la maturation des raisins et la qualité des vins de Pinot noir. La restriction progressive et modérée en eau en cours de saison a provoqué une vigueur plus faible des rameaux et favorisé la maturation des raisins (teneur en sucres des baies plus élevée et acidité plus faible) en comparaison de vignes sans contrainte hydrique. Les vins ont été plus colorés et riches en composés phénoliques, et préférés à la dégustation. La fertilité des bourgeons, le poids des baies et des grappes à la vendange n'ont pas été influencés par la contrainte hydrique modérée subie par la vigne. Un stress hydrique plus sévère a par contre entraîné la diminution de la photosynthèse et de la transpiration du feuillage, ainsi que de la teneur en azote des feuilles et des baies.

hebdomadaire, s'est élevé à 9 l/m²/semaine (16 l/souche) sur une durée de neuf semaines, soit 81 l/m² de sol ou 145 l/souche.

- B: variante non irriguée.
- C: variante non irriguée avec la pose d'une bâche imperméable et non réfléchissante au sol, afin d'éliminer les eaux de pluie de fin avril aux vendanges et pour créer un stress hydrique important, si possible.

L'essai a été implanté en split-plot avec quatre répétitions par variante et mode d'irrigation. La récolte a été limitée en visant une production d'environ 1 kg/m².

Régime hydrique de la vigne et échanges gazeux du feuillage

L'état hydrique de la vigne a été déterminé au moyen de trois indicateurs physiologiques que sont le potentiel hydrique foliaire de base, le potentiel hydrique de tige et la composition isotopique du carbone dans les sucres du moût à la vendange. Le potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) a été mesuré en fin de nuit, à l'obscurité complète, avec une chambre à pression de marque PMS Instrument and Co., modèle 1002 (Scholander *et al.* 1965). Le potentiel hydrique de tige (Ψ_{tige}) a été déterminé en cours d'après-midi sur des feuilles ensachées préalablement (une heure avant la mesure) avec de

l'aluminium pour diminuer fortement leur transpiration. Les mesures de potentiel hydrique de base et de tige ont été faites sur des feuilles adultes, non sénescentes, situées dans la zone médiane du rameau. La composition isotopique du carbone ($\delta^{13}\text{C}$ ou rapport entre le ^{13}C et le ^{12}C) a été analysée sur des échantillons de moût prélevés au foulage de la vendange selon la méthodologie d'Avice *et al.* (1996).

La mesure des échanges gazeux des feuilles (photosynthèse A et transpiration E) et de la conductance stomatique (gs), qui représente le degré d'ouverture des stomates, a été réalisée au moyen d'un analyseur à infrarouge LI-6400, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA: elle a été effectuée sur des feuilles adultes et ensoleillées de rameaux principaux (éclairage saturant $> 1800 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), de juin à la mi-octobre.

L'efficacité instantanée de l'utilisation de l'eau (WUE, Water Use Efficiency en anglais) a été calculée à partir des mesures d'échanges gazeux de feuilles isolées en mettant en rapport le taux de photosynthèse (A) et la transpiration des feuilles (E) selon la formule suivante: $WUE_{\text{inst}} = A/E$.

Des compléments d'information concernant l'étude du régime en eau de la vigne et les échanges gazeux sont disponibles dans la publication de Zufferey *et al.* (2017).

Observations viticoles et vinifications

Les composantes du rendement comme la fertilité (nombre d'inflorescences par rameau), le poids des baies et des grappes à la vendange ont été déterminées pour chaque variante d'irrigation. L'analyse du taux de N, P, K, Ca et Mg des feuilles situées dans la zone des grappes à la véraison (diagnostic foliaire) a été effectuée. L'indice chlorophyllien a été évalué par la mesure du N-tester (Yara, Nanterre, France) sur des feuilles adultes au-dessus de la zone des grappes à la véraison. En hiver, les bois de taille par souche (dix souches par répétition) ont été pesés. A la vendange, les paramètres suivants ont également été examinés: le rendement, la teneur en sucres (% Brix), les taux d'acidité totale, d'acides tartrique et malique, le pH et la teneur en azote assimilable des moûts (indice de formol), selon la méthode proposée par Aerny (1996).

Chaque variante d'irrigation a fait l'objet d'une vinification durant la période 2009–2015. Les vins ont été vinifiés de manière standard avec foulage, égrappage et sulfitage (50 mg/l) de la vendange. Les vins ont subi une fermentation malolactique avant d'être stabilisés chimiquement et physiquement. Des mesures d'anthocyanes (DO 520) et de l'indice des polyphénols totaux (DO 280) en vins ont été effectuées selon Ribéreau-Gayon *et al.* (1998). Les vins ont été dégustés chaque année par un

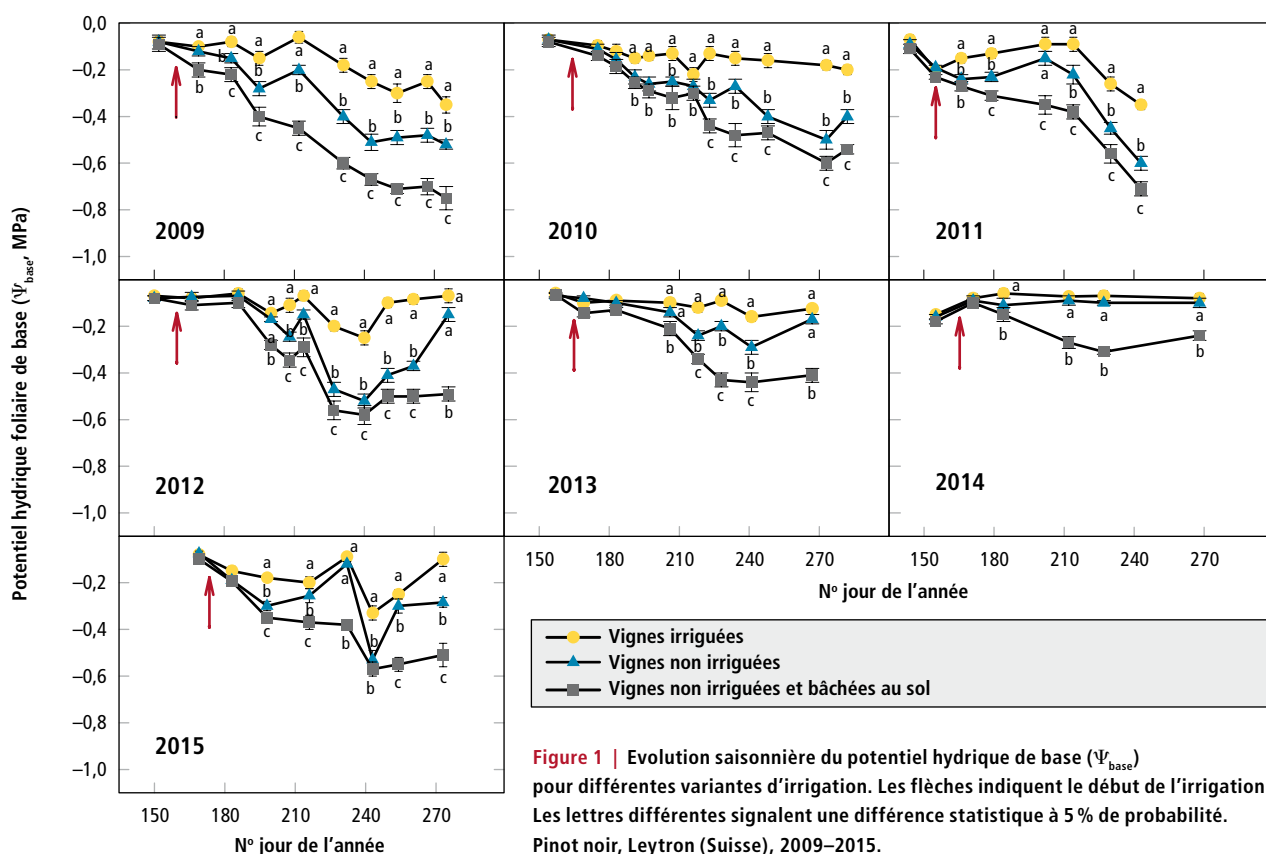


Figure 1 | Evolution saisonnière du potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) pour différentes variantes d'irrigation. Les flèches indiquent le début de l'irrigation. Les lettres différentes signalent une différence statistique à 5% de probabilité. Pinot noir, Leytron (Suisse), 2009–2015.

panel de douze dégustateurs d'Agroscope. L'analyse sensorielle de près de 23 descripteurs s'est réalisée selon une échelle de notation allant de 1 (faible, mauvais) à 7 (élevé, excellent).

Résultats et discussion

Caractérisation du régime hydrique de la vigne

La croissance et les échanges gazeux (photosynthèse et transpiration) du feuillage sont largement dépendants de l'alimentation en eau de la vigne. La mesure du potentiel hydrique foliaire de base (Ψ_{base}), réalisée de nuit, renseigne sur les disponibilités en eau du sol pour la plante, en lien avec la capacité de colonisation racinaire (van Zyl 1987). Cette mesure permet d'évaluer la force avec laquelle l'eau est retenue dans les tissus de la plante. Plus les valeurs du Ψ_{base} sont négatives, plus l'eau est retenue fortement et exprime une contrainte hydrique croissante. Les valeurs du potentiel hydrique sont exprimées de nos jours en mégapascals (MPa): une valeur de $-1,0$ MPa correspond à -10 bars. Van Leeuwen *et al.* (2009) ont proposé des seuils d'interprétation du potentiel hydrique de base pour caractériser la contrainte hydrique: si les valeurs sont supérieures à $-0,15$ Mpa, on estime que la contrainte hydrique est nulle. Des valeurs situées entre $-0,15$ et $-0,3$ Mpa signalent une contrainte faible. De $-0,3$ à $-0,5$ MPa, la contrainte devient modérée, et pour des valeurs inférieures à $-0,5$ MPa, la contrainte est considérée comme forte.

Les différents niveaux d'irrigation testés à Leytron ont entraîné des régimes hydriques de la vigne très contrastés selon les millésimes (fig. 1). L'irrigation, réalisée au goutte-à-goutte de la floraison à la véraison, a permis de maintenir un régime hydrique non limitant tout au long de la saison (valeurs du Ψ_{base} supérieures à $-0,3$ MPa). L'absence d'irrigation a provoqué une contrainte hydrique modérée, se déclenchant dans la majorité des années autour de la véraison et se poursuivant jusqu'à la récolte selon les précipitations estivales. Durant les étés chauds et secs de 2009 et 2011 (tabl. 1 et 2), la contrainte hydrique est devenue forte dans les vignes non irriguées et bâchées au sol (valeurs du Ψ_{base} inférieures à $-0,5$ MPa). Dans ce cas, le fort stress hydrique associé à des températures très élevées du feuillage ($>40^\circ\text{C}$) ont causé un jaunissement et un dessèchement des feuilles de la base des rameaux en fin de saison. La pose d'une bâche imperméable au sol a permis d'obtenir un stress hydrique sévère et d'étudier ainsi la réponse physiologique et agronomique du Pinot noir à la sécheresse.

L'analyse de la composition isotopique du carbone ($\delta^{13}\text{C}$ ou rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), effectuée sur les sucres du moût à la vendange, constitue un bon indicateur de la contrainte hydrique subie par la vigne durant la période d'accumulation des sucres dans les baies (Gaudillère *et al.* 2002). Le carbone 12 (isotope ^{12}C), plus léger que le carbone 13 (^{13}C), est assimilé de manière préférentielle lors de la photosynthèse quand les stomates sont ouverts et que la plante est bien alimentée en eau. ➤

Tableau 1 | Précipitations mensuelles (mm) sur le site expérimental de Leytron (Suisse) durant les sept années d'étude, en comparaison avec les moyennes à long terme (1981–2010)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Long terme
Janvier	109	11	22	57	21	42	55	51
Février	28	29	7	0	59	79	11	47
Mars	23	27	14	5	29	5	63	42
Avril	37	8	5	51	45	29	12	35
Mai	25	120	43	52	83	34	123	49
Juin	40	15	40	37	24	17	34	54
Juillet	87	73	69	51	52	106	35	58
Août	16	45	22	65	30	87	78	57
Septembre	18	22	42	52	45	15	14	44
Octobre	11	14	34	39	67	30	29	52
Novembre	68	36	2	53	95	44	42	52
Décembre	108	70	168	152	17	42	4	64
Année	570	470	468	614	567	530	500	603

Tableau 2 | Températures mensuelles ($^\circ\text{C}$) sur le site expérimental de Leytron (Suisse) durant les sept années d'étude, en comparaison avec les moyennes à long terme (1981–2010)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Long terme
Janvier	-2,7	-1,5	0,2	1,5	1	2,6	1,4	-0,1
Février	1	1,5	2,9	-1,7	0	4,2	1,3	1,8
Mars	5,9	6,1	7,9	9,1	5,2	8,4	7,9	6,5
Avril	12,4	11,8	14,2	10,9	10,9	12,8	12,2	10,4
Mai	16,4	14	17	16,1	12,5	15,6	15,6	14,9
Juin	18,4	18,9	18,8	20	18,1	20,1	20,6	18,1
Juillet	20,5	21,8	18,6	20,3	21,6	19,3	24	20,1
Août	21,6	18,5	21	21,3	20,2	18,4	20,9	19,2
Septembre	16,8	14,8	17,8	15,8	16,3	16,9	14,9	15,2
Octobre	10,3	10,3	10,4	11,5	12,7	13	10,5	10,3
Novembre	6,7	5,5	5,2	6,4	3,8	8,1	5,9	4,3
Décembre	1	-0,6	1,9	0,6	0,4	2,7	2,2	0,6
Année	10,7	10,1	11,3	11	10,1	11,7	11,5	10,1

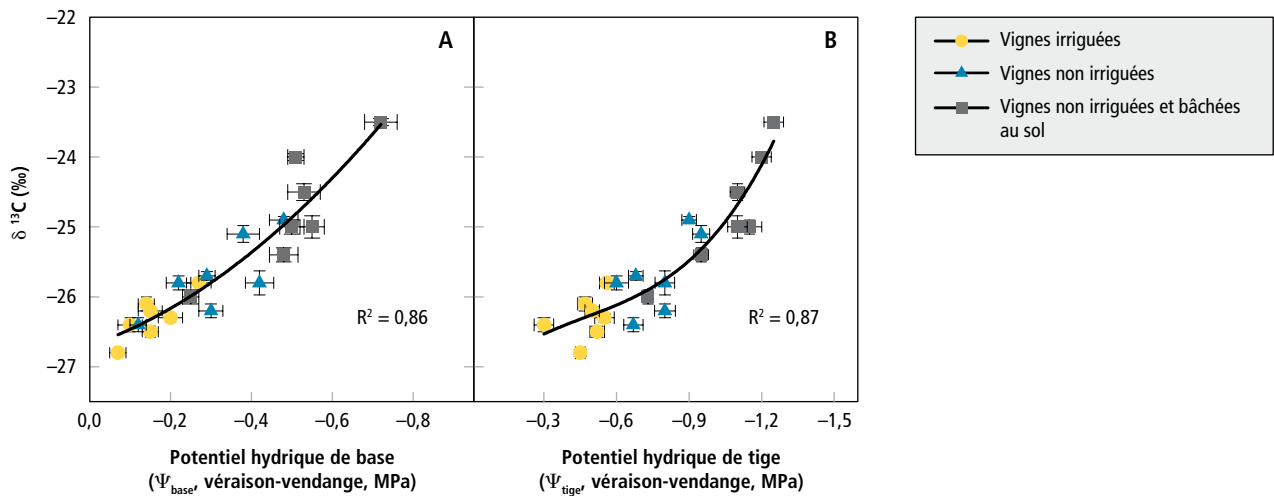


Figure 2 | Relation entre le potentiel hydrique de base (Ψ_{base} , A), le potentiel hydrique de tige (Ψ_{tige} , B), mesurés durant la période allant de la véraison à la vendange, et la composition isotopique de carbone ($\delta^{13}C$) dans les sucres des moûts à la vendange pour différentes variantes d'irrigation. Pinot noir, Leytron (Suisse), 2009–2015.

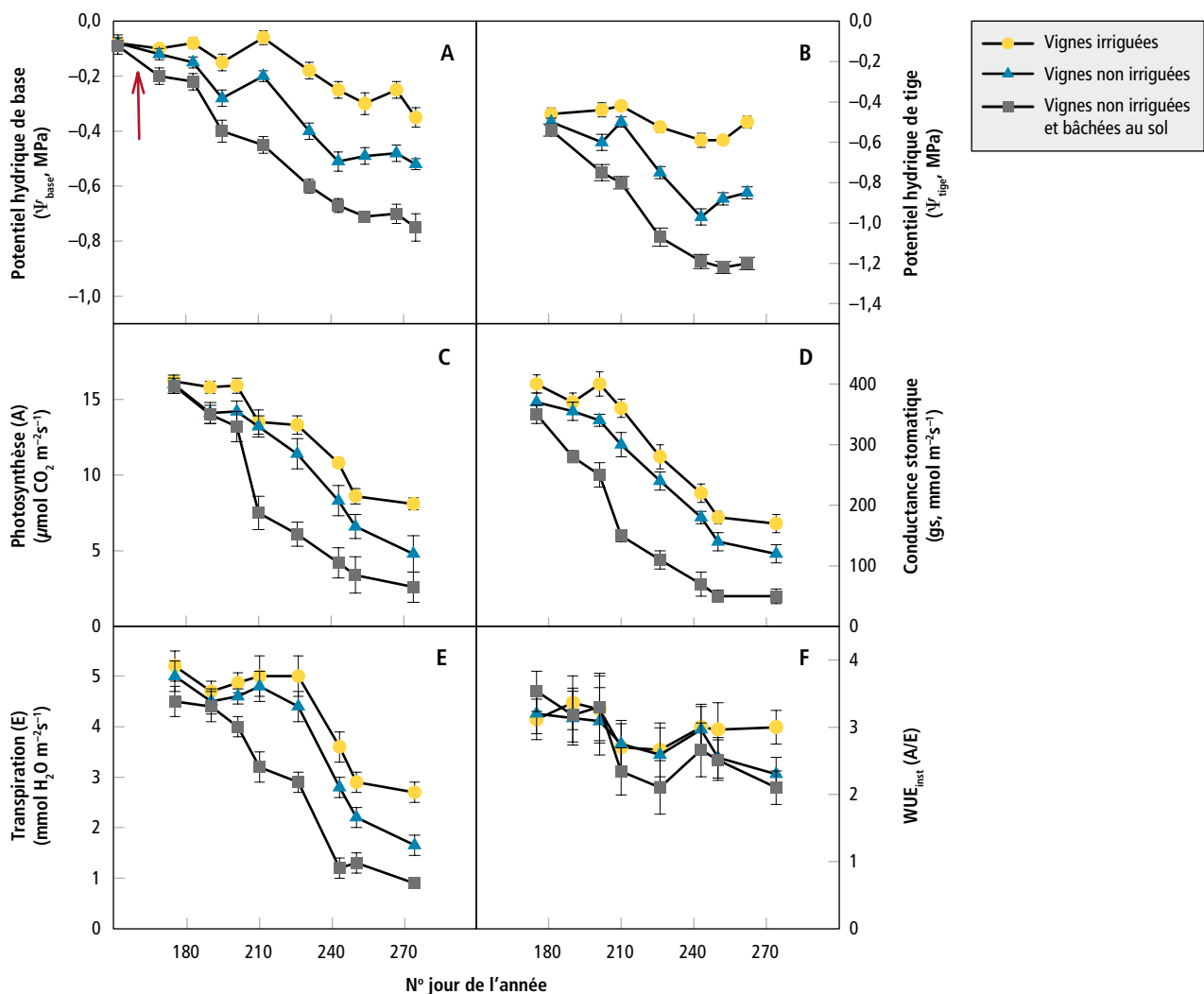


Figure 3 | Evolution saisonnière du potentiel hydrique de base (Ψ_{base} , A), du potentiel hydrique de tige (Ψ_{tige} , B), de la photosynthèse (C), de la conductance stomatique (D), de la transpiration (E) et de l'efficacité instantanée d'utilisation de l'eau (WUE_{inst} , F) pour différentes variantes d'irrigation. Pinot noir, Leytron (Suisse), 2009.

En période de sécheresse, on observe par contre un enrichissement en ^{13}C dans les sucres des raisins, car les stomates et les enzymes impliqués dans le processus photosynthétique ne discriminent plus aussi efficacement les isotopes de C. Une corrélation a été observée entre la composition isotopique et les valeurs du potentiel hydrique de base et de tige (fig. 2). Des valeurs plus élevées (moins négatives) de $\delta^{13}\text{C}$ indiquent une contrainte hydrique plus importante. L'intérêt de l'indicateur $\delta^{13}\text{C}$ réside dans la simplicité de sa mise en œuvre par rapport aux indicateurs classiques du régime hydrique de la vigne que sont les potentiels hydriques foliaires.

Echanges gazeux du feuillage

L'accroissement de la contrainte hydrique en cours de saison, observé dans les variantes non irriguées, conduit à la fermeture progressive des stomates (diminution de la conductance stomatique g_s), réduisant par conséquent la photosynthèse et la transpiration des feuilles (fig. 3). La diminution des échanges gazeux est déjà perceptible pour des valeurs de potentiel hydrique de base inférieures à $-0,3\text{ MPa}$, et de potentiel hydrique de tige à $-1,1\text{ MPa}$. Ces observations correspondent à une étude précédente, effectuée sur le même cépage (Spring et Zufferey 2009). Le contrôle stomatique des échanges gazeux constitue un mécanisme d'adaptation précoce à la restriction en eau subie par la plante afin d'éviter des accidents physiologiques comme l'embolie des vaisseaux (Lovisolo *et al.* 2008). La réponse des cépages à la sécheresse s'effectue également par des mécanismes de résistance hydraulique au flux d'eau à travers la plante, de la racine jusqu'aux feuilles (Zufferey *et al.* 2011), et par le rapport entre le développement racinaire et foliaire entre autres. Par ailleurs, dans les conditions relativement sèches du Valais, Spring (1997) a montré que la transpiration du Pinot noir était plus sensible à la demande climatique (température et humidité de l'air) qu'à l'état hydrique du feuillage, qui est plutôt bien contrôlé chez ce cépage. En cours de saison, le vieillissement graduel des feuilles

provoque également l'affaiblissement des échanges gazeux et de conductance stomatique (g_s).

Le rapport entre le taux de photosynthèse et celui de la transpiration (A/E), qui exprime l'efficacité instantanée de l'utilisation de l'eau ou WUE_{inst} , a légèrement diminué en cours de saison: il a été par contre peu influencé par le stress hydrique croissant dans les vignes non irriguées en comparaison des vignes irriguées. La température et l'humidité de l'air sont des facteurs qui agissent largement sur le ratio A/E (Prieto *et al.* 2010) et ont certainement joué un rôle déterminant en plus du déficit hydrique dans notre étude.

Alimentation minérale et vigueur de la vigne

L'accroissement du déficit hydrique dans les variantes non irriguées a globalement provoqué une baisse de la teneur en éléments nutritifs dans les feuilles à la véraison, particulièrement pour l'azote et le phosphore (tabl. 3). L'indice chlorophyllien du feuillage (N-tester) et la teneur en azote assimilable des raisins à la vendange ont été plus faibles dans les vignes non irriguées et bâchées au sol ayant souffert d'une forte restriction en eau en comparaison des vignes irriguées. L'absorption des nutriments, dissous dans le sol, dépend largement du flux hydrique à travers la plante (Keller 2015), c'est-à-dire de la transpiration du feuillage. L'assèchement du sol, associé à des températures élevées durant la période estivale, peut nuire à la minéralisation des nutriments (surtout l'azote) avec une diminution de l'activité microbienne (Celette *et al.* 2009) et à leur absorption dans le courant transpiratoire de la plante. Divers auteurs (Reynard *et al.* 2011; Spring *et al.* 2012) ont montré l'effet d'un déficit hydrique (d'origine climatique ou pédologique) durant la période estivale sur la teneur plus faible en azote du feuillage et des baies.

L'accroissement du déficit hydrique dans les vignes non irriguées et bâchées au sol s'est traduit par une chute des feuilles dans la zone basale des rameaux après la véraison et une réduction de la surface foliaire, parfois importante durant les été chauds et secs comme 2009, 2011 et 2015 (de -30 à -50%), en comparaison

Tableau 3 | Alimentation minérale de la vigne: diagnostic foliaire (% M.S.), teneur en N, P, K, Ca et Mg des feuilles à la véraison. Indice chlorophyllien du feuillage (N-tester) et azote assimilable du moût (indice formol) à la vendange. Les lettres différentes indiquent une différence significative à 5% de probabilité. Moyennes 2009–2015, Pinot noir, Leytron (Suisse)

	Diagnostic foliaire (% M.S.)					N-tester	Indice formol
	N	P	K	Ca	Mg		
Vignes irriguées	2,40a	0,41a	1,01a	4,48a	0,36a	655a	15,3a
Vignes non irriguées	2,35ab	0,34b	1,05a	4,31a	0,34a	652a	15,0a
Vignes non irriguées et bâchées au sol	2,19b	0,34b	1,04a	4,30a	0,32a	634b	12,2b

des vignes irriguées. La réduction de la croissance foliaire et des rameaux est l'une des conséquences tangibles et précoces due à la contrainte hydrique de la vigne. L'arrêt de la croissance des rameaux a été utilisé comme un indicateur pertinent du statut hydrique de la vigne (Pellegrino *et al.*, 2005). L'arrêt de la croissance végétative (notamment des rameaux secondaires) et la chute des feuilles limitent la transpiration globale de la plante tout en réduisant l'assèchement du sol: ces phénomènes participent au maintien d'un Ψ_{base} stable en fin de saison, comme ce fut le cas dans notre étude. Année après année, les vignes ayant subi une contrainte hydrique modérée à forte ont montré une vigueur plus faible des rameaux que les vignes irriguées sans stress hydrique (tabl. 4).

Croissance et composition des baies

La restriction progressive en eau, observée à partir de la véraison et jusqu'à la récolte dans les vignes non irriguées, n'a pas entraîné de diminution significative du poids des baies et des grappes, ni de la fertilité des bourgeons, comparé à des vignes bien alimentées en

eau (tabl. 5). Le rendement n'a par conséquent pas été trop affecté par le déficit hydrique survenu durant la maturation du raisin, à l'exception des millésimes très secs (2009, 2011 et 2015), durant lesquels les vignes non irriguées ont présenté des rendements un peu plus faibles (–10 à –15 %) que les vignes irriguées (résultats non présentés).

Le tableau 6 montre l'effet marqué de l'alimentation en eau sur la teneur en sucres des moûts à la vendange. La contrainte hydrique modérée a favorisé l'accumulation des sucres dans les variantes non irriguées, en conséquence d'un arrêt précoce de la croissance des rameaux secondaires qui conduit à une distribution des sucres de la photosynthèse préférentiellement vers les baies. Dans notre étude, les vignes non irriguées ont montré des teneurs en acidité totale et en acide malique plus basses en moût que celles des vignes irriguées sans stress hydrique. La réduction de l'acidité totale et la dégradation de l'acide malique semblent être liées au microclimat des grappes (baies exposées au rayonnement direct) chez les vignes non irriguées et stressées, en raison de la chute des feuilles dans la zone

Tableau 4 | Poids des bois de taille (g/cep) par année et sur la moyenne 2009–2015. Les lettres différentes indiquent une différence significative à 5 % de probabilité. Pinot noir, Leytron (Suisse)

	Poids des bois de taille (g/cep)							Moyenne 2009–2015
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
Vignes irriguées	701a	750a	720a	903a	807a	717a	788a	770a
Vignes non irriguées	722a	735a	592b	763b	819a	671a	700b	715ab
Vignes non irriguées et bâchées au sol	689a	696a	423c	727b	681b	575b	622b	630b

Tableau 5 | Composantes du rendement: fertilité des bourgeons (nombre de grappes par bois), dégrappage par cep, poids des baies et des grappes à la vendange et rendement par m² de sol. Les lettres différentes indiquent une différence significative à 5 % de probabilité. Moyennes 2009–2015, Pinot noir, Leytron (Suisse)

	Fertilité des bourgeons (grappes/bois)	Dégrappage (–x grappes par cep)	Poids des baies (g)	Poids des grappes (g)	Rendement (kg/m ²)
Vignes irriguées	1,9a	–4a	1,2a	172a	0,82a
Vignes non irriguées	1,9a	–4a	1,2a	165a	0,75a
Vignes non irriguées et bâchées au sol	1,9a	–4a	1,1a	158a	0,77a

Tableau 6 | Caractéristiques de la vendange: teneur en sucre et acidité des moûts (acidité totale, tartrique et malique) et pH. Les lettres différentes indiquent une différence significative à 5 % de probabilité. Moyennes 2009–2015, Pinot noir, Leytron (Suisse)

	Sucres		pH	Acidité totale (g/l)	Acide tartrique (g/l)	Acide malique (g/l)
	(% Brix)	(mg/baie)				
Vignes irriguées	23,2a	276a	3,20a	8,5a	6,5a	3,9a
Vignes non irriguées	24,0ab	290b	3,22a	7,8b	6,3a	3,3ab
Vignes non irriguées et bâchées au sol	24,5b	286b	3,19a	7,6b	6,4a	2,9b

des grappes. Le pH du moût n'a pas été influencé par le stress hydrique, conformément à d'autres observations (McCarthy 2000). En vin, aucune différence significative n'a été relevée concernant l'acidité et le pH.

Polyphénols et qualité des vins

Les variantes non irriguées se distinguent par des vins plus colorés (teneur plus élevée en anthocyanes) et plus riches en composés phénoliques, mesurés par l'indice des polyphénols totaux (DO 280), que les variantes irriguées (tabl. 7). Dans notre étude, les anthocyanes principaux synthétisés dans les baies et analysés dans le vin ont été la malvidine 3-*O*- β glucoside et la péonidine 3-*O*- β glucoside (résultats non présentés), qui représentent près de 80 % de la proportion des cinq antho-

cyanidines (delphinidine, cyanidine, péonidine, pétunidine et malvidine) présentes dans les baies de *Vitis vinifera*.

La figure 4 illustre les résultats des dégustations réalisées par le panel de dégustateurs d'Agroscope de quatre descripteurs clés: le bouquet, la structure des vins, la qualité des tanins et l'appréciation générale des vins.

Globalement, les vins issus de vignes non irriguées ont été mieux appréciés.

Dans notre étude, la structure du vin et la qualité des tanins (tanins tendres et enrobés pour les vignes non irriguées) ont été jugées supérieures lors d'une contrainte hydrique modérée subie par la vigne. Celle-ci permet l'obtention d'une meilleure maturation des raisins et des composés phénoliques très appréciés en dégustation. Le statut hydrique de la plante apparaît comme un facteur déterminant de la qualité des vins, particulièrement des vins rouges (van Leeuwen *et al.* 2009) avec des effets positifs lors d'une contrainte modérée se mettant en place autour de la véraison et se poursuivant durant la maturation du raisin.

Tableau 7 | Teneur en anthocyanes et indice des polyphénols totaux (IPT) en vins. Les lettres différentes indiquent une différence significative à 5 % de probabilité. Moyennes 2009–2015, Pinot noir, Leytron (Suisse)

	Anthocyanes (mg/l)	Indice phénols totaux (IPT)
Vignes irriguées	314a	30a
Vignes non irriguées	394b	34a
Vignes non irriguées et bâchées au sol	401b	35a

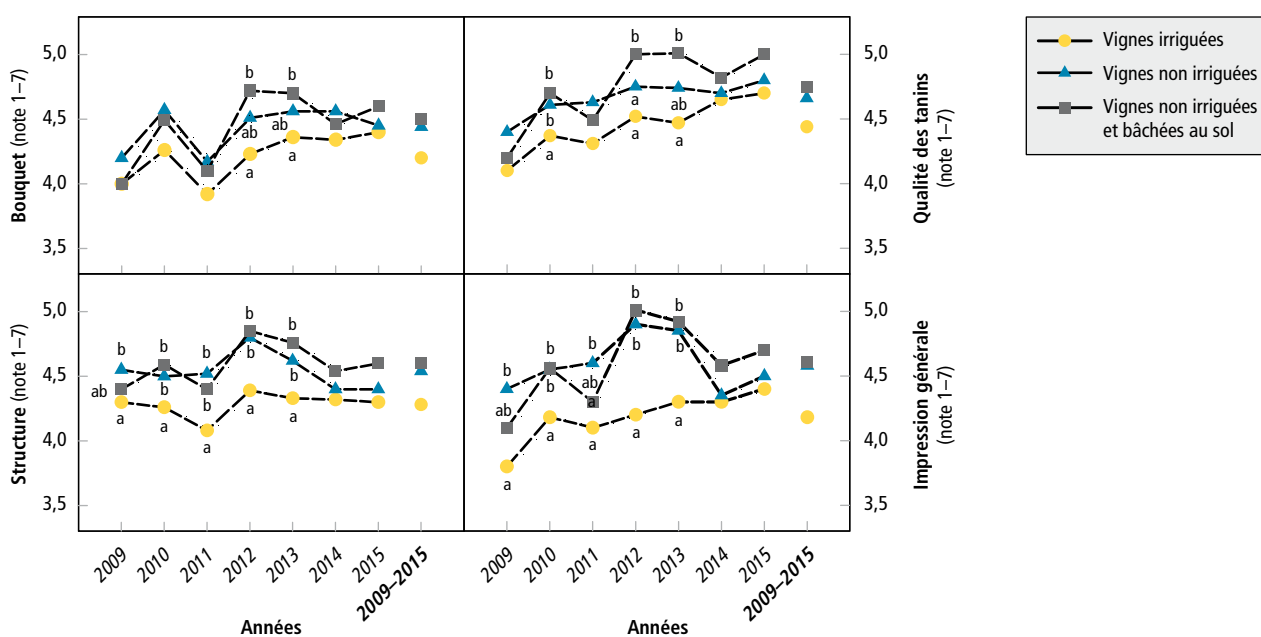


Figure 4 | Appréciation organoleptique de la qualité des vins en fonction de différents descripteurs: le bouquet, la structure, la qualité des tanins et l'impression générale pour différentes variantes d'irrigation. Notation de 1 = faible, mauvais à 7 = élevé, excellent. Pinot noir, Leytron (Suisse), 2009–2015.

Conclusions

- L'essai d'irrigation, conduit dans les conditions relativement sèches du Valais central à Leytron, a permis de confirmer l'effet positif d'une contrainte hydrique modérée durant la maturation du raisin de Pinot noir. Cet effet a porté sur:
 - un arrêt de la croissance végétative durant la maturation;
 - une meilleure accumulation des sucres dans les baies;
 - une plus faible teneur en acidité totale et en acide malique des baies;
 - des vins plus colorés et riches en polyphénols;
 - des vins aux tanins plus tendres et enrobés, et plus structurés;
 - des vins préférés à la dégustation.
- Les composantes du rendement (fertilité des bourgeons, poids des baies et des grappes) n'ont pas été influencées par la restriction modérée en eau (contrainte modérée).
- Avec un stress hydrique plus sévère, les échanges gazeux du feuillage et la teneur en azote des feuilles et des raisins ont diminué.
- En été, l'arrêt de la croissance des rameaux principaux et secondaires exprime un état de contrainte hydrique modéré subi par la vigne. Le jaunissement puis la chute des feuilles dans la zone des grappes sont le signe d'un stress hydrique plus sévère. Les mesures des potentiels hydriques de nuit et de tige, ainsi que la composition isotopique du carbone (^{13}C) des sucres du moût, a permis de bien caractériser l'alimentation en eau de la vigne durant la saison. ■

Remerciements

Les équipes de viticulture, de technologie et d'analyse des vins à Agroscope sont chaleureusement remerciées pour leur excellent travail et leur précieuse collaboration.

Bibliographie

- Aerny J., 1996. Composés azotés des moûts et des vins. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **28** (3), 161–165.
- Avice J., Ourry A., Lemaire G. & Boucaud J., 1996. Nitrogen and carbon flows estimated by ^{15}N and ^{13}C pulse-chase labeling regrowth of alfafa. *Plant Physiol.* **112**, 281–290.
- Chaves M. M., Zarrouk O., Francisco R., Costa J. M., Santos T., Regalado A. P., Rodrigues M. L. & Lopes C. M., 2010. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Ann. Bot.* **105**, 661–676.
- Celette F., Findeling A. & Gary C., 2009. Competition for nitrogen in an unfertilized intercropping system: the case of an association of grapevine and grass cover in a Mediterranean climate. *Eur. J. Agron.* **30**, 41–51.
- Deloire A., Carbonneau A., Wang Z. & Ojeda H., 2004. Vine and water, a short review. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **38**, 1–13.
- Gaudillère J.-P., van Leeuwen C. & Ollat N., 2002. Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *J. Exp. Bot.* **53**, 757–763.
- Keller M., 2015. *The Science of Grapevines. Anatomy and Physiology*. Second Edition, Academic Press, Elsevier, San Diego CA.
- Lovisolo C., Perrone I., Hartung W. & Schubert A., 2008. An abscisic acid-related reduced transpiration promotes gradual embolism repair when grapevines are rehydrated after drought. *New Phytologist* **180**, 642–651.
- Matthews M. A. & Anderson M. M., 1989. Reproductive development in grape (*Vitis vinifera* L.): responses to seasonal water deficits. *Am. J. Enol. Vitic.* **40**, 52–60.
- McCarthy M. G., 2000. Developmental variation in sensitivity of *Vitis vinifera* L. (Shiraz) berries to soil water deficit. *Aust. J. Grape Wine Res.* **6**, 136–140.
- Pereira L. S., Smith M. & Allen R., 1998. Méthode pratique de calcul des besoins en eau, 206–231. In: J. R. Tiercelin (ed.) *Traité d'Irrigation*. Editions Lavoisier TEC et DOC.
- Pellegrino A., Lebon E., Simonneau T. & Wery J., 2005. Towards a simple indicator of water stress in grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components. *Aust. J. Grape Wine Res.* **11**, 306–315.
- Prieto J. A., Lebon E. & Ojeda H., 2010. Stomatal behavior of different grapevine cultivars in response to soil water status and air water vapor pressure deficit. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **44**, 9–20.
- Reynard J.-S., Zufferey V., Nicol G. C. & Murisier F., 2011. Soil parameters impact the vine-fruit-wine continuum by altering vine nitrogen status. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **45**, 211–221.
- Ribéreau-Gayon P., Dubourdieu D., Donèche B. & Lonvaud A., 1998. *Traité d'Enologie Tome 1: Microbiologie du Vin, Vinifications*. Dunod, Paris.
- Scholander P. F., Bradstreet E. D., Hemmingsen E. A. & Hammel H. T., 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* **148**, 339–346.
- Spring J.-L., 1997. Comportement physiologique des cépages Chasselas, Sylvaner, Gamay et Pinot noir dans les conditions sèches du Valais central. *Revue Suisse Vitic. Arboric. Hortic.* **29**, 265–271.
- Spring J.-L. & Zufferey V., 2009. Influence de l'irrigation sur le comportement de la vigne et sur la qualité de vins rouges dans les conditions du Valais central. *Revue Suisse Vitic. Arboric. Hortic.* **41**, 103–111.
- Spring J.-L., Verdenal T., Zufferey V. & Viret O., 2012. Nitrogen dilution in excessive canopies of Chasselas and Pinot noir cvs. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **46**, 233–240.
- Van Leeuwen C. & Seguin G., 1994. Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement

Summary

Influence of Water Supply on Vine Behaviour and Pinot Noir Wine Quality: Assessment of an Irrigation Trial in Leytron (Canton of Valais)

An irrigation trial conducted from 2009 to 2015 at the Agroscope experimental station in Leytron confirmed the positive effect of moderate water stress on the ripening of Pinot Noir grapes and on the quality of the wines produced from them. Progressive, moderate water stress in the course of the season resulted in less-vigorous stem growth and favoured grape ripening (higher sugar content and lower acidity of the berries) compared to vines without water stress. The wines were more coloured and richer in phenolic compounds, as well as being preferred in tastings. Bud fertility and the weight of the berries and clusters at harvest were not affected by the moderate water stress undergone by the vine. By contrast, more-severe water stress caused a decrease in leaf photosynthesis and in transpiration, as well as in leaf and berry nitrogen content.

Key words: plant water status, grapevine physiology, berry composition, wine quality.

Zusammenfassung

Einfluss der Wasserversorgung auf das Verhalten der Reben und auf die Weinqualität von Pinot noir: Bilanz eines Bewässerungsversuchs in Leytron (VS)

Im Rahmen eines Bewässerungsversuchs auf dem Versuchsstandort von Agroscope in Leytron wurde der positive Effekt einer moderaten Einschränkung der Wasserversorgung auf die Reifung von Reben der Sorte Pinot noir und auf die Qualität des daraus produzierten Weines bestätigt. Die zunehmende, mässig stark eingeschränkte Wasserzufuhr im Laufe der Vegetationsperiode hat im Vergleich zu Reben ohne Wasserstress zu einem weniger stark ausgeprägten Triebwachstum geführt und die Traubenreife gefördert (höherer Zuckergehalt und geringerer Säuregehalt der Beeren). Die Weine waren farbintensiver, reicher an Phenolverbindungen und wurden bei der Degustation bevorzugt. Die Fruchtbarkeit der Knospen sowie das Gewicht der Beeren und Trauben bei der Ernte wurden durch die eingeschränkte Wasserversorgung der Rebe nicht beeinflusst. Eine stärkere Einschränkung der Wasserversorgung hat hingegen zu einer Abnahme der Photosynthese, der Verdunstung der Blätter und des Stickstoffgehaltes der Blätter und Beeren geführt.

Riassunto

Influenza dell'acqua sul comportamento della vigna in termini di qualità del Pinot nero: bilancio di un test di irrigazione a Leytron (VS)

Un test dell'irrigazione condotto tra il 2009 e il 2015 nel vigneto sperimentale di Agroscope a Leytron ha permesso di confermare l'effetto positivo della restrizione idrica moderata sulla maturazione degli acini e sulla qualità del vino di Pinot nero. La restrizione progressiva e moderata di acqua durante la stagione ha ridotto il vigore dei ramoscelli e favorito la maturazione degli acini (tenore in zuccheri delle bacche più elevato e acidità ridotta) nel confronto con le vigne senza restrizione idrica. I vini prodotti erano più colorati e ricchi in composti fenolici e, durante le degustazioni, sono stati preferiti agli altri. La fertilità dei germogli, il peso delle bacche e dei grappoli durante la vendemmia non sono stati influenzati dalle restrizioni idriche moderate subite dalla vigna. Con uno stress idrico più intenso si sono invece osservate diminuzioni della fotosintesi e della traspirazione delle foglie così come del tenore di azoto nelle foglie e nelle bacche.

de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion, 1990). *J. Int. Sci. Vigne Vin* **28**, 81–110.

- Van Leeuwen C., Trégoat O., Choné X., Bois B., Pernet D. & Spring J.-L., 1997. Comportement physiologique des cépages Chasselas, Sylvaner, Gamay et Pinot noir dans les conditions sèches du Valais central. *Revue Suisse Vitic. Arboric. Hortic.* **29**, 265–271.
- Van Leeuwen C., Trégoat O., Choné X., Bois B., Pernet D. & Gaudillère J.-P., 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *J. Int. Sci. Vigne Vin* **43**, 121–134.
- Van Zyl J. L., 1987. Diurnal variation in grapevine water stress as a function of changing soil water status and meteorological conditions. *S. Afr. Enol. Vitic.* **8**, 2, 45–50.
- Zufferey V., Cochar H., Ameglio T., Spring J.-L. & Viret O., 2011. Diurnal cycles of embolism formation and repair in petioles of grapevine (*Vitis vinifera* cv. Chasselas). *J. Exp. Bot.* **62**, 3885–3894.
- Zufferey V., Spring J.-L., Verdenal T., Lorenzini F., Dienes-Nagy Á., Belcher S., Koestel C., Rösti J., Spangenberg J. & Viret O., 2017. Impacts of water stress on the grapevine physiology and the quality of "Pinot noir" wines in Switzerland. *OENO One* **51**, 1, 17–27.