

Effet du régime hydrique sur le comportement de la vigne et la qualité des vins de petite Arvine

Vivian ZUFFEREY¹, Thibaut VERDENAL¹, Agnes DIENES-NAGY¹, Sandrine BELCHER¹, Fabrice LORENZINI¹, Carole KOESTEL, Marie BLACKFORD¹, Gilles BOURDIN¹, Katia GINDRO¹, Jorge E. SPANGENBERG², Johannes RÖSTI³, Olivier VIRET⁴, Christoph CARLEN¹ et Jean-Laurent SPRING¹

¹Agroscope Changins, 1260 Nyon, Suisse

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

³Service de l'agriculture, station viticole de l'Etat, République et Canton de Neuchâtel, rue des Fontenettes 37, 2012 Auvornier, Suisse

⁴Service de l'agriculture et de la viticulture (SAVI), avenue de Marcelin 29, 1110 Morges, Suisse

Renseignements: Vivian Zufferey, e-mail: vivian.zufferey@agroscope.admin.ch



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

Introduction

L'état hydrique de la vigne dépend de facteurs liés à la parcelle (nature du sol, réserve en eau, mésoclimat) et varie selon des facteurs génétiques (cépage/porte-greffe) et agronomiques (entretien du sol, densité de plantation, rapport feuille-fruit...). En fonction des conditions climatiques et des types de sols, la gestion des besoins en eau de la vigne peut varier considérablement. Dans un contexte général de changement climatique et d'économie des ressources naturelles, la

disponibilité en eau est un élément clé pour l'agriculture et la viticulture en particulier. Dans la grande majorité des pays viticoles, la vigne est irriguée par pompage de l'eau des nappes phréatiques, alors que, traditionnellement, cette culture était implantée dans des situations où l'irrigation reste une exception. Dans les vignobles en zones sèches, comme en Valais, l'irrigation a de tout temps été pratiquée grâce à la construction des bisses pour acheminer l'eau des torrents dans les vignobles. Les études menées sur la caractérisation des terroirs viticoles (van Leeuwen *et al.* 1994) ont

montré depuis longtemps l'influence prépondérante des conditions d'alimentation en eau de la vigne sur le comportement physiologique (photosynthèse, alimentation minérale, croissance) et la qualité des raisins et des vins. La grande capacité d'exploration racinaire de la vigne permet à celle-ci d'endurer des restrictions importantes en eau selon les terroirs. Néanmoins, un stress hydrique intense entraîne la diminution des échanges gazeux (photosynthèse et transpiration), provoque un arrêt précoce de la croissance végétative (Chaves *et al.* 2010) et peut causer des pertes de rendement considérables.

Il est connu que non seulement l'intensité de la sécheresse, mais également sa période d'apparition et sa durée influent sur la taille finale des baies, par conséquent sur le rendement, et sur leur composition (Deloire *et al.* 2004). Une contrainte hydrique progressive (dès la nouaison) et modérée conduit à un ralentissement et/ou un arrêt de la croissance végétative autour de la véraison qui favorise la production de raisins plus riches en sucres, en anthocyanes et en composés phénoliques et moins acides (van Leeuwen *et al.* 2009; Zufferey *et al.* 2017). Pour élaborer des vins blancs de grande qualité, il est par ailleurs reconnu que les vignes doivent être bien pourvues en éléments minéraux, et notamment en azote (Bell et Henschke, 2005): pour cette raison, elles ne devraient subir aucune restriction trop importante en eau, qui conduirait à une perte de l'expression aromatique et de la typicité des vins (Reynolds *et al.* 2010; Reynard *et al.* 2011; Verdenal *et al.* 2012).

L'Arvine est un cépage très apprécié pour la typicité de ses vins aux arômes complexes, fruités et floraux (Spring *et al.* 2014). Cette typicité aromatique provient des composés soufrés de la famille des thiols, principalement le 3-mercaptop-hexanol (Fretz *et al.* 2005), dont les arômes évoquent le pamplemousse, le citron, la rhubarbe et les fruits exotiques. Ces arômes sont liés dans le moût au glutathion et à la cystéine (P-3MH) et libérés sous forme volatile durant la fermentation alcoolique (Tominaga *et al.* 2000).

Pour étudier l'influence de l'alimentation en eau sur le comportement agronomique de la vigne et la qualité des raisins et des vins de Petite Arvine, 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 ont été analysés et les résultats présentés dans cet article.

Résumé ■ Un essai d'irrigation a été mené de 2009 à 2016 au domaine expérimental d'Agroscope à Leytron, afin d'étudier l'effet du régime hydrique de la vigne sur le comportement physiologique (échanges gazeux, vigueur), agronomique (composantes du rendement, composition des raisins) et la qualité des vins de Petite Arvine. La restriction en eau observée dans les vignes non irriguées a provoqué une vigueur plus faible des rameaux. Le rendement et ses composantes (fertilité des bourgeons, poids des baies et des grappes) n'ont pas été fortement impactés par l'état hydrique des souches. La concentration en azote des moûts a par contre diminué avec l'accroissement du stress hydrique. La teneur en sucres et en précurseur aromatique (3-mercaptop-hexanol, P-3MH) n'a pas été influencée par le régime hydrique de la vigne. Les vins issus de vignes ayant souffert d'une forte restriction en eau et en azote assimilable (vignes non irriguées lors des millésimes chauds et secs) ont présenté une typicité et une expression aromatique plus faibles au bouquet et une amertume plus élevée en bouche que les vins provenant de vignes bien pourvues en eau et en azote. De manière générale, l'appréciation sensorielle des vins a été meilleure pour les vins de Petite Arvine issus de vignes bien alimentées en eau et en azote durant la saison.

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental

L'expérimentation a été menée de 2009 à 2016 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 (tab. 1). L'essai a été planté avec le cépage Arvine, greffé sur 5BB, en 1995. La vigne est conduite en mi-haute, avec une taille Guyot simple (180x100 cm) en maintenant six rameaux par souche. Trois variantes ont été mises en place.

La première variante a été 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 hebdomadaire, s'est élevé à 9l/m²/semaine (16l/souche) sur une durée de neuf semaines, soit 81l/m² de sol ou 145l/souche. La deuxième variante n'a pas été irriguée. Enfin, la troisième variante n'a pas été irriguée, et une bâche imperméable et non réfléchissante a été posée au sol afin d'éliminer les eaux de pluie de la fin d'avril jusqu'aux vendanges, et de 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 1,4 kg/m² avec une suppression de sept grappes par cep au stade petit pois.

Régime hydrique de la vigne et échanges gazeux du feuillage

L'état hydrique de la vigne a été déterminé au moyen d'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 préala-

blement (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 à la vendange, selon la méthodologie d'Avicé *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, Etats-Unis: 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.

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

La fertilité des rameaux (nombre d'inflorescences par rameau) et le poids des baies et des grappes à la vendange ont été déterminés pour chaque variante d'irrigation. L'analyse des 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,

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

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Long terme
Janvier	109	11	22	57	21	42	55	110	51
Février	28	29	7	0	59	79	11	104	47
Mars	23	27	14	5	29	5	63	19	42
Avril	37	8	5	51	45	29	12	38	35
Mai	25	120	43	52	83	34	123	76	49
Juin	40	15	40	37	24	17	34	45	54
Juillet	87	73	69	51	52	106	35	46	58
Août	16	45	22	65	30	87	78	27	57
Septembre	18	22	42	52	45	15	14	14	44
Octobre	11	14	34	39	67	30	29	32	52
Novembre	68	36	2	53	95	44	42	75	52
Décembre	108	70	168	152	17	42	4	0	64
Année	570	470	468	614	567	530	500	586	603

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 2009-2016. 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. Les vins ont été dégustés chaque année par un panel de douze dégustateurs d'Agroscope. L'analyse sensorielle de nombreux descripteurs (liés au bouquet et à la qualité des vins en bouche) 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 mesure du potentiel hydrique foliaire de base (ψ_{base}), réalisée à l'obscurité et de nuit, renseigne sur la disponibilité en eau du sol pour la plante au moment où la transpiration du feuillage est au plus bas. Des valeurs seuils ont été établies pour caractériser la contrainte hydrique (Van Leeuwen *et al.* 2009) chez différents cé-

pages dont le Chasselas (Zufferey *et al.* 2019). Si les valeurs du ψ_{base} 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.

La mesure du potentiel hydrique du feuillage peut être également effectuée au cours de la journée sur des feuilles ensachées (potentiel hydrique de tige) ou non (potentiel hydrique foliaire): selon la technique utilisée et le moment de la journée, des seuils d'interprétation de l'état hydrique de la vigne ont été proposés (Zufferey *et al.* 2019).

Les différentes variantes d'irrigation testées au domaine expérimental d'Agroscope de Leytron ont provoqué des régimes hydriques de la vigne très contrastés selon les millésimes (fig. 1). L'irrigation, réalisée de la floraison à la véraison au goutte-à-goutte, a permis de maintenir un régime hydrique non limitant tout au long de la saison, avec des valeurs du ψ_{base} généralement supérieures à -0,3 MPa. L'absence d'irrigation a entraîné une contrainte hydrique modérée de la vigne, qui s'est déclenchée dans la majorité des années autour de la véraison et s'est poursuivie jusqu'à la récolte selon les précipitations estivales. Durant les millésimes chauds et secs en 2009, 2011, 2015 et 2016 (tab. 2), la contrainte hydrique est devenue forte dans les vignes non irriguées et bâchées au sol avec les valeurs du ψ_{base} inférieures à -0,5 MPa (fig. 1). Dans cette situation, le

Tableau 2 | Températures moyennes mensuelles et annuelles (°C) sur le site expérimental de Leytron (Suisse) durant les huit années d'étude en comparaison avec les moyennes à long terme (1981–2010).

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Long terme
Janvier	-2,7	-1,5	0,2	1,5	1,0	2,6	1,4	2,2	-0,1
Février	1,0	1,5	2,9	-1,7	0,0	4,2	1,3	4,4	1,8
Mars	5,9	6,1	7,9	9,1	5,2	8,4	7,9	6,6	6,5
Avril	12,4	11,8	14,2	10,9	10,9	12,8	12,2	11,3	10,4
Mai	16,4	14,0	17,0	16,1	12,5	15,6	15,6	14,7	14,9
Juin	18,4	18,9	18,8	20,0	18,1	20,1	20,6	18,7	18,1
Juillet	20,5	21,8	18,6	20,3	21,6	19,3	24,0	21,5	20,1
Août	21,6	18,5	21,0	21,3	20,2	18,4	20,9	21,0	19,2
Septembre	16,8	14,8	17,8	15,8	16,3	16,9	14,9	18,4	15,2
Octobre	10,3	10,3	10,4	11,5	12,7	13,0	10,5	10,1	10,3
Novembre	6,7	5,5	5,2	6,4	3,8	8,1	5,9	5,8	4,3
Décembre	1,0	-0,6	1,9	0,6	0,4	2,7	2,2	-0,7	0,6
Année	10,7	10,1	11,3	11,0	10,1	11,7	11,5	11,2	10,1

fort stress hydrique associé à des températures très élevées du feuillage (>40°C), notamment en 2009 et 2011, ont causé le jaunissement des feuilles de la base des rameaux et leur chute en cours d'été. 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 de l'Arvine à la sécheresse.

L'appréciation du statut hydrique de la vigne en fonction du niveau d'irrigation a été complétée par des analyses de la composition isotopique du carbone ($\delta^{13}\text{C}$ ou rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) sur les sucres des raisins à la vendange (résultats non présentés). En cas de sécheresse, les stomates se ferment progressivement et exercent une discrimination plus intense entre les isotopes de carbone (^{12}C et ^{13}C) qui sont absorbés par les feuilles lors de la photosynthèse: on observe dans ce cas un enrichissement de l'isotope ^{13}C dans les sucres des moûts. La composition isotopique $\delta^{13}\text{C}$ 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) et a souvent été utilisée pour la caractérisation des terroirs viticoles (Zufferey *et al.* 2017).

Echanges gazeux du feuillage

La croissance et les échanges gazeux (photosynthèse et transpiration) du feuillage sont largement dépendants de l'alimentation en eau de la vigne. L'augmentation de la contrainte hydrique, observée dans les variantes non irriguées en cours de saison et bâchées au sol, 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. 2). La diminution des échanges gazeux est déjà perceptible pour des valeurs de potentiel hydrique de base inférieures à -0,3 MPa, et de potentiel hydrique de tige à -1,1 MPa. Ces observations correspondent à diverses études précédentes, effectuées sur les cépages Pinot noir (Spring et Zufferey, 2009; Zufferey *et al.* 2017) et Chasselas (Zufferey *et al.* 2018). La photosynthèse nette a été diminuée de 30 à 50% dès la fin de juillet (n° de jour 210) chez les vignes souffrant d'une restriction en eau par rapport aux vignes irriguées, de même que la transpiration foliaire. La réponse de la vigne à la sécheresse s'effectue à court terme à travers la fermeture progressive des stomates, mais aussi par des mécanismes de résistance hydraulique au flux

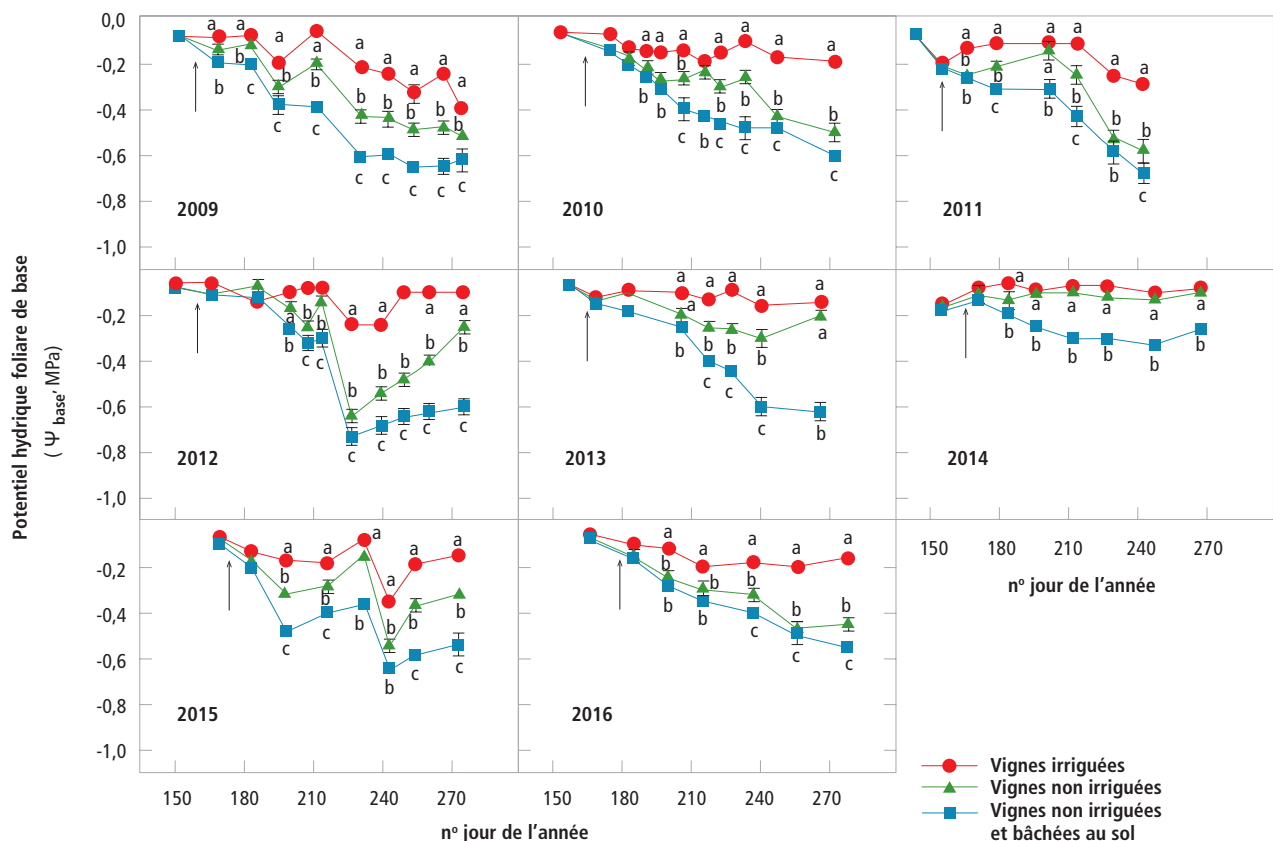


Figure 1 | Evolution saisonnière du potentiel hydrique de base (ψ_{base}) pour différentes variantes d'irrigation. Les flèches indiquent le début de l'irrigation. Les lettres différentes signalent une différence statistique à 5% de probabilité. Arvine, Leytron (Suisse), 2009–2016.

d'eau à travers la plante, de la racine jusqu'aux feuilles, et par le rapport entre le développement racinaire et foliaire entre autres. 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).

Alimentation minérale et vigueur de la vigne

L'accroissement du déficit hydrique dans les variantes non irriguées a provoqué une légère baisse de la teneur en éléments nutritifs des feuilles (N, P, K, Ca) à la véraison (tab. 3), à l'inverse de la teneur en magnésium des feuilles, qui a augmenté. Ces résultats confirment ceux obtenus avec d'autres cépages dans les mêmes conditions d'étude (Zufferey *et al.* 2017, 2018). L'indice chlorophyllien du feuillage (N-tester), mesuré à la véraison, a légèrement diminué avec l'accroissement de

la contrainte hydrique. La teneur en azote assimilable des raisins à la vendange a été plus faible dans les vignes non irriguées et bâchées au sol ayant souffert d'une forte restriction en eau en comparaison des vignes irriguées. Une corrélation a été mise en évidence entre le régime hydrique de la vigne (potentiel hydrique moyen mesuré durant la période véraison-récolte) et l'azote assimilable des moûts à la vendange (fig. 3). Nos résultats corroborent les observations de divers auteurs (Reynard *et al.* 2011; Spring et Zufferey 2011; Spring *et al.* 2012) montrant l'effet dépressif d'un déficit hydrique (d'origine climatique ou pédologique) durant la période estivale sur la teneur en azote du feuillage et des baies. Par ailleurs, Verdenal *et al.* (2012) ont également mentionné que l'alimentation hydrique et azotée était un marqueur de l'effet terroir en relation avec la qualité des vins de Petite Arvine dans les conditions pédoclimatiques du Valais.

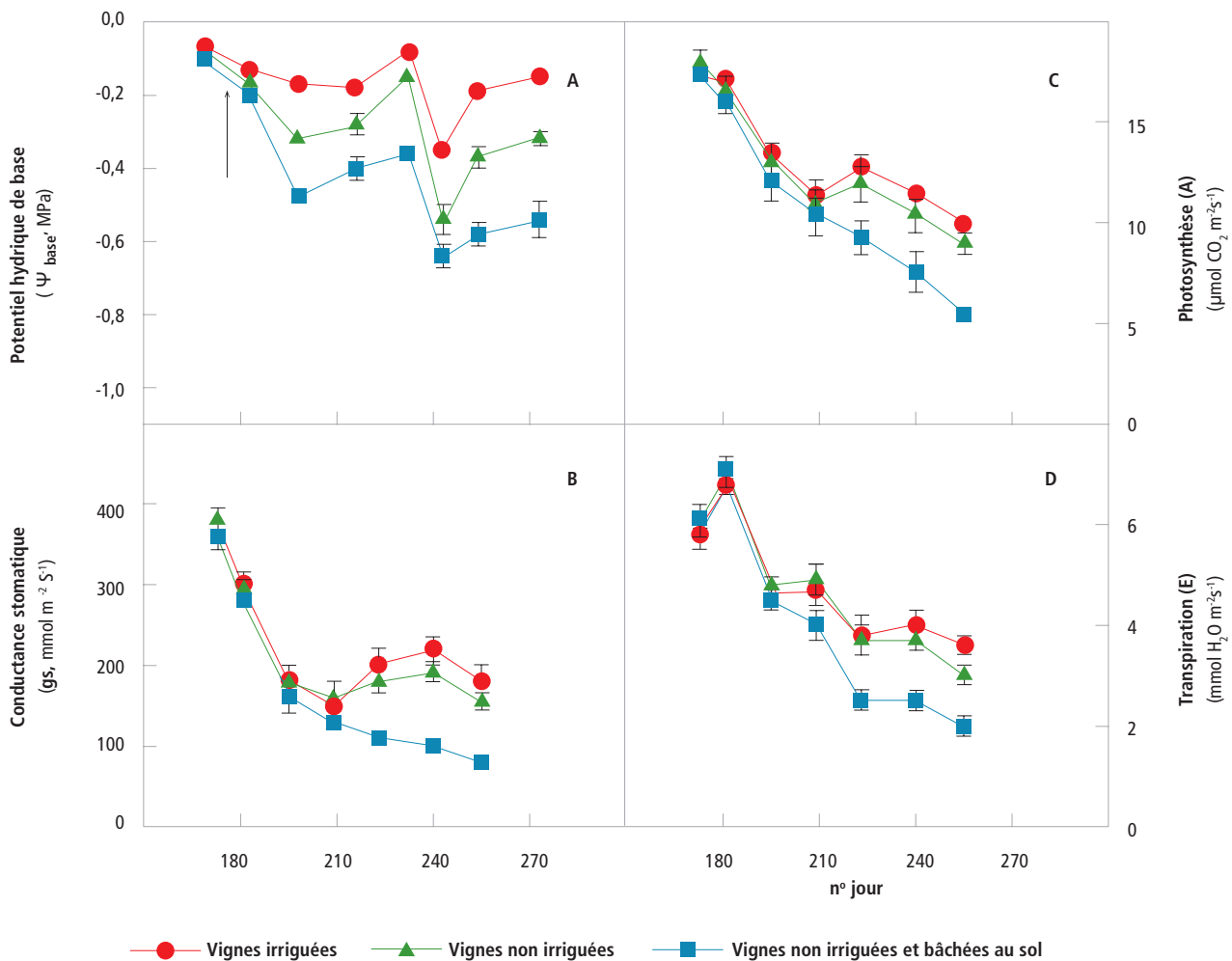


Figure 2 | Evolution saisonnière du potentiel hydrique de base (ψ_{PD} , A), de la conductance stomatique (B), de la photosynthèse (C) et de la transpiration (D) pour différentes variantes d'irrigation. Arvine, Leytron (Suisse), 2015.

L'absorption des nutriments dissous dans le sol dépend en grande partie 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.

Les vignes ayant subi une contrainte hydrique modérée à forte année après année ont montré une vigueur plus faible des rameaux (-20% environ des poids de bois de taille en moyenne des huit années d'étude)

que les vignes irriguées sans stress hydrique (tab. 4). Les conditions estivales sèches en 2009, 2011, 2015 et 2016 ont entraîné une réduction de la surface foliaire par chute des feuilles de la zone basale des rameaux pouvant atteindre jusqu'à 30% dans les vignes non irriguées et bâchées au sol, en comparaison des vignes irriguées. 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.

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 de la fertilité des bourgeons et du poids des grappes, en comparaison des vignes bien alimentées en eau (tab. 5). Seul le poids des baies a été significativement plus faible dans les vignes ayant subi un manque d'eau important en cours de saison. 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, 2015 et 2016), durant lesquels les vignes non irriguées ont présenté des rendements un peu plus faibles (jusqu'à 15%) que les vignes irriguées (résultats non présentés). Il faut noter qu'une suppression de cinq grappes par cep a été effectuée chaque année en juillet (stade «petit pois» des baies) dans notre essai.

Le tableau 6 présente les caractéristiques des moûts à la vendange, comme la teneur en sucres, en acidité totale, tartrique et malique, le pH et les valeurs en glycosyl-glucose (G-G) et en précurseur aromatique (3-mercaptop-hexanol, P-3MH). Le régime hydrique de la vigne n'a pas exercé d'influence marquée sur la teneur en sucres, ni sur le pH des moûts. La

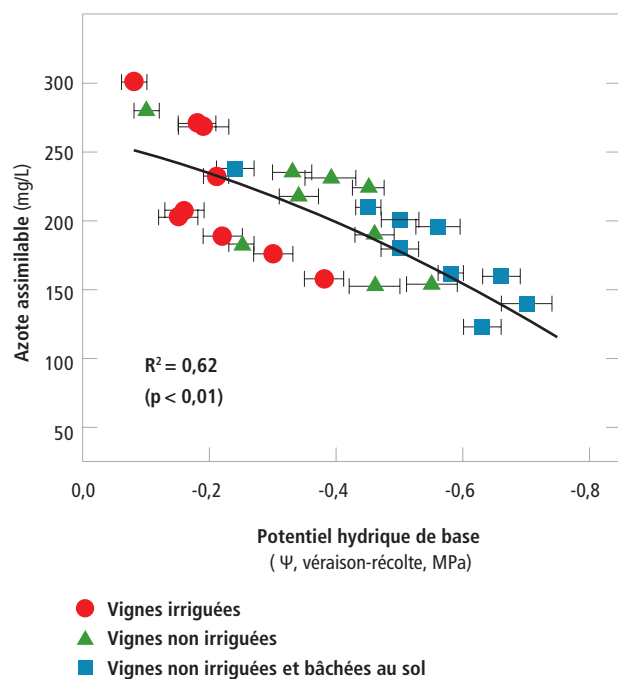


Figure 3 | Relation entre le potentiel hydrique de base (moyenne des mesures entre la véraison et la récolte) et la teneur en azote assimilable dans les moûts à la vendange pour différentes variantes d'irrigation. Arvine, Leytron (Suisse), 2009–2016.

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 à la vendange. Les lettres différentes indiquent une différence significative à 5% de probabilité. Moyennes 2009–2016, Arvine, Leytron (Suisse).

	Diagnostic foliaire (% M.S.)					N-tester	Azote assimilable (mg N/l)
	N	P	K	Ca	Mg		
Vignes irriguées	2,58a	0,26a	1,04a	4,29a	0,29a	524a	231a
Vignes non irriguées	2,46a	0,25a	0,97ab	4,14a	0,33b	509a	215ab
Vignes non irriguées et bâchées au sol	2,35a	0,22a	0,84b	4,10a	0,36b	483a	189b

teneur en acide malique et en acidité totale des moûts a été inférieure chez les vignes ayant subi une contrainte hydrique modérée à forte (vignes non irriguées), en comparaison des vignes bien alimentées en eau (avec irrigation). Le stress hydrique observé dans les vignes non irriguées et bâchées au sol a entraîné le jaunissement, puis la chute des feuilles de la zone basale des rameaux lors des millésimes chauds et secs (2009, 2011 et 2015): le microclimat de la zone des grappes a été par conséquent modifié, provoquant une augmentation de l'exposition des grappes à la lumière directe et probablement une élévation de la température des baies. Ces conditions ont ainsi pu entraîner la dégradation de l'acide malique des baies et une diminution de l'acidité totale des moûts (Ruf-

fnér, 1982a, b). L'acide tartrique a par contre augmenté avec l'accroissement de la contrainte hydrique.

Le potentiel aromatique de l'Arvine a été évalué par l'analyse globale des composés glycosylés (méthode G-G) et la quantification directe du précurseur 3-mercapto-hexanol (P-3MH) dans les moûts. Les valeurs de G-G ont été plus élevées dans les vignes non irriguées avec une contrainte hydrique modérée à forte en comparaison des vignes irriguées sans stress. Des résultats identiques avaient été obtenus par Dienes-Nagy *et al.* (2016) dans une étude comparant divers cépages et plusieurs millésimes aux conditions climatiques variées: lors de millésimes chauds et secs, la teneur en G-G des moûts avait été plus élevée que lors de millésimes pluvieux et frais. La concentration en

Tableau 4 | Poids des bois de taille (g/cep) par année et sur la moyenne 2009–2016. Les lettres différentes indiquent une différence significative à 5% de probabilité. Arvine, Leytron (Suisse).

	Poids des bois de taille (g/cep)								Moyenne 2009-2016
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Vignes irriguées	643a	650a	640a	696a	644a	626a	540a	479a	615a
Vignes non irriguées	555b	630a	574b	647a	638a	585a	546a	489a	579a
Vignes non irriguées et bâchées au sol	503b	590a	407c	566b	490b	453b	506a	474a	500b

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 mètre carré de sol. Les lettres différentes indiquent une différence significative à 5% de probabilité. Moyennes 2009–2016, Arvine, Leytron (Suisse).

	Fertilité des bourgeons (g/bois)	Dégrappage (-x grappes par cep)	Poids des baies (g)	Poids des grappes (g)	Rendement (kg/m ²)
Vignes irriguées	1,8a	-5a	1,3a	240a	0,93a
Vignes non irriguées	1,8a	-5a	1,2a	225a	0,91a
Vignes non irriguées et bâchées au sol	1,8a	-5a	1,0b	208a	0,86a

Tableau 6 | Caractéristiques de la vendange: teneur en sucres, pH, acidité des moûts (acidité totale, tartrique et malique), glycosyl-glucose (G-G) et en précurseur aromatique (P-3MH) dans le moût. Les lettres différentes indiquent une différence significative à 5% de probabilité. Moyennes 2009–2016, Arvine, Leytron (Suisse).

	Sucres (°Oe)	pH	Acidité totale (g/L)	Acide tartrique (g/L)	Acide malique (g/L)	G-G (mg/L)	P-3MH (µg/L)
Vignes irriguées	101a	3,07a	10,9a	8,1a	4,8a	41a	48a
Vignes non irriguées	100a	3,06a	10,4b	8,3a	4,0ab	44ab	47a
Vignes non irriguées et bâchées au sol	99a	3,04a	9,7b	8,7b	2,9b	48b	48a

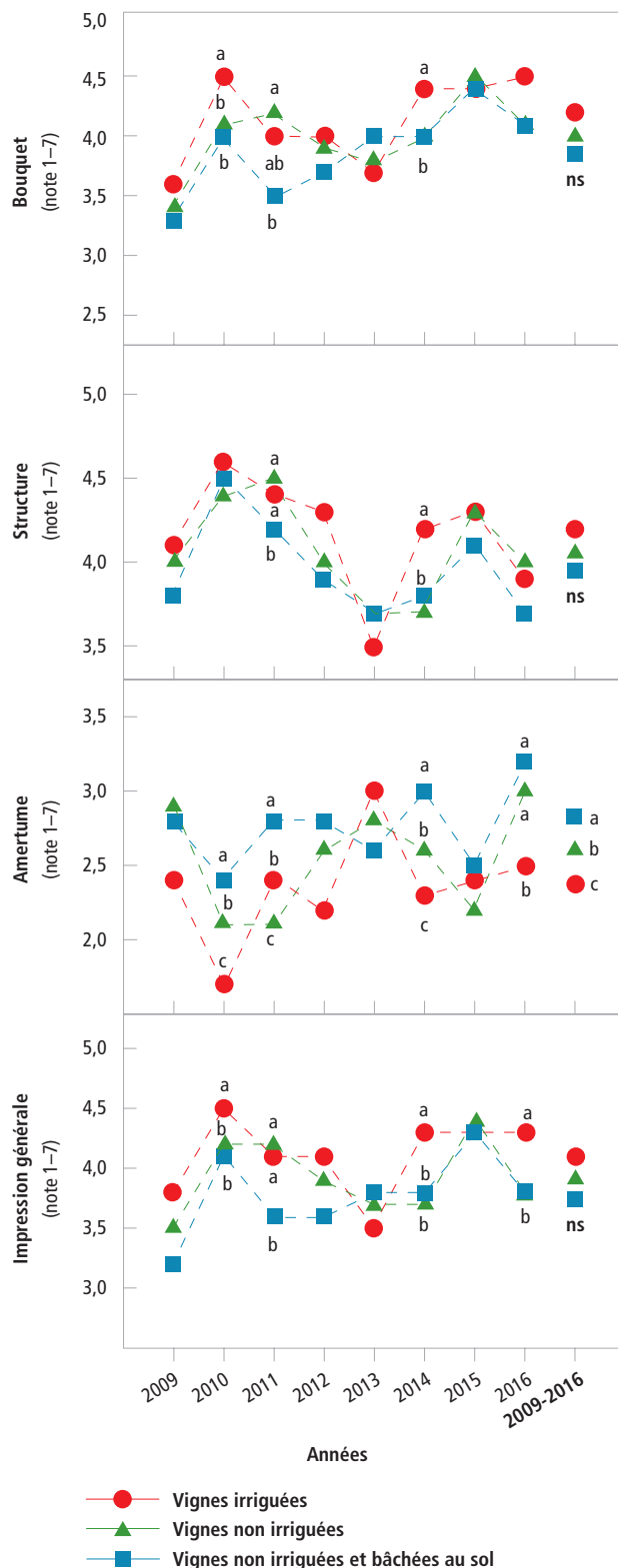


Figure 4 | Appréciation organoleptique de la qualité des vins en fonction de différents descripteurs: le bouquet, la structure, l'amertume et l'impression générale pour différentes variantes d'irrigation. Notation de 1 = faible, mauvais à 7 = élevé, excellent. Arvine, Leytron (Suisse), 2009–2016.

P-3MH des moûts, observée selon le régime hydrique de la vigne, n'a par contre pas montré de différence significative entre les vignes irriguées et non irriguées. Par ailleurs, la quantité de P-3MH en moût peut être influencée par la présence de *Botrytis cinerea* sur raisins (Thibon *et al.* 2011; Spring *et al.* 2014), ce champignon provoquant une surproduction du P-3MH dans ce cas. Durant la période de notre étude, la présence de *Botrytis cinerea* a été inexistante quels que soient l'année ou le régime hydrique imposé à la vigne.

Qualité des vins

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

La qualité du bouquet (typicité et finesse des arômes) a été jugée un peu moins intéressante dans les vins dont les raisins sont issus de vignes non irriguées et ayant subi un stress hydrique fort, notamment en 2010 et 2011, en comparaison des vignes bien alimentées en eau (vignes irriguées). Sur l'ensemble des années, les différences ne sont toutefois pas toujours significatives. L'alimentation azotée des moûts quelque peu déficitaire (concentration en azote assimilable dans le moût, inférieure à 200 mg/l, Spring et Lorenzini, 2006) observée dans les vignes souffrant d'un stress hydrique a certainement joué un rôle dans l'appréciation du bouquet, mais aussi sur la perception de l'amertume et de l'astringence des vins en bouche. En effet, les vins issus de vignes stressées en eau et en azote disponible (vignes non irriguées et bâchées au sol) ont été marqués par des notes importantes d'amertume en comparaison de vins provenant de vignes bien alimentées en eau et en azote (vignes irriguées). Ces résultats corroborent les conclusions émises par Verdenal *et al.* (2012) concernant l'importance des conditions d'alimentation en eau et en azote des vignes d'Arvine et leur impact sur la qualité des vins issus de divers terroirs. Dans notre étude, l'appréciation globale des vins (note hédonique) a été jugée supérieure dans les vins issus de vignes irriguées et bien pourvues en azote assimilable, en comparaison de vignes avec une forte restriction en eau et moins bien pourvues en azote assimilable, notamment lors des millésimes chauds et secs comme 2009, 2010 et 2011. Les études menées par Spring *et al.* (2014) sur les effets de l'alimentation azotée et la typicité des vins d'Arvine ont montré qu'une teneur en azote assimilable dans les moûts, inférieure à 180–200 mg/l, provoquait la diminution de la concentration en précurseurs aromatiques dans les moûts

(P-3MH) et en arômes dans les vins. Dans notre étude, la teneur en azote assimilable est restée en moyenne des années supérieures à 180 mg/l, également dans les vignes non irriguées et bâchées au sol: ainsi, la teneur en P-3MH a été globalement équivalente dans les moûts de vignes irriguées et non irriguées.

L'absence de contrainte hydrique tend généralement à favoriser le développement des composés aromatiques chez les cépages blancs (Reynold *et al.* 2010) grâce à une bonne alimentation azotée des moûts qui exhausse la typicité et la qualité des vins blancs (Tominaga *et al.* 2000; Peyrot des Gachons *et al.* 2005; Reynard *et al.* 2011).

Conclusions

- L'essai d'irrigation conduit avec le cépage Arvine dans les conditions relativement sèches du Valais central à Leytron a montré qu'une contrainte hydrique faible durant la saison permettait d'obtenir des moûts plus riches en azote assimilable que lorsque la contrainte hydrique devenait modérée à forte.
- Les vins issus de vignes marquées par le stress hydrique et carencées en azote assimilable dans les moûts ont présenté des bouquets moins typés et moins expressifs, ainsi que des notes importantes d'amertume et d'astringence en bouche, en comparaison des vins issus de vignes bien alimentées en eau et azote.
- Les composantes du rendement (fertilité des bourgeons, poids des baies et des grappes) n'ont pas été influencées par la restriction modérée en eau.
- Avec un stress hydrique sévère, les échanges gazeux du feuillage et la teneur en azote des feuilles et des raisins ont diminué. Le jaunissement du feuillage, puis la chute des feuilles dans la zone des grappes ont été la manifestation d'un stress hydrique important.
- La mesure des potentiels hydriques de nuit et de tige ainsi que la composition isotopique du carbone (^{13}C) des sucres du moût ont permis de bien caractériser l'alimentation en eau de la vigne durant la saison. ■

Remerciements

Les équipes de viticulture, d'œnologie 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 Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **28**, 3, 161-165.
- Avicé J., Ourry A., Lemaire G. & Boucaud J., 1996. Nitrogen and carbon flows estimated by ^{15}N and ^{13}C pulse-chase labeling regrowth of alfalfa. *Plant Physiol.* **112**, 281-290.
- Bell S.-J. & Henschke P.A., 2005. Implications of nitrogen nutrition for grapes, fermentation and wine. *Austr. J. Grape Wine Res.* **11**, 242-295.
- 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.
- Dienes-Nagy A., Nardone D., Cléroux M., Riesen R., Frey U. & Lorenzini F., 2016. Méthodes analytiques de mesure du potentiel aromatique des raisins. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **48** (2), 102-109.
- Fretz C.B., Luisier J.-L., Tominaga T. & Amado R., 2005. 3-Mercaptohexanol: An Aroma Impact Compound of Petite Arvine Wine. *Am. J. Enol. Vitic.* **56** (4), 407-410.
- 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.
- Peyrot des Gachons C.P., van Leeuwen C., Tominaga T., Soyer J.P., Gaudillère J.P. & Dubourdieu D., 2005. Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L. cv Sauvignon blanc in field conditions. *J. Sci. Food Agric.* **85**, 73-85.
- 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.
- Reynolds A., De Savigny C. & Willwerth J., 2010. Riesling terroir in Ontario vineyards. The roles of soil texture, vine size and vine water status. *Progress Agric. Vitic.* **127**, 212-222.
- Ruffner H.P., 1982a. Metabolism of tartaric and malic acids in *Vitis*: a review-part a. *Vitis* **21**, 247-259.
- Ruffner H.P., 1982b. Metabolism of tartaric and malic acids in *Vitis*: a review-part b. *Vitis* **21**, 346-358.
- 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. & Lorenzini F., 2006. Effet de la pulvérisation foliaire d'urée sur l'alimentation azotée et la qualité du Chasselas en vigne enherbée. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **38** (2), 105-113.
- 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 Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **41**, 103-111.
- Spring J.-L. & Zufferey V., 2011. Irrigation: comportement de la vigne et qualité des vins de cépages blancs dans le Valais central. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **43**, 162-171.
- 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.

- Spring J.-L., Zufferey V., Dienes-Nagy A., Lorenzini F., Frey U., Thibon C., Darriet P. & Viret O., 2014. Effet de l'alimentation azotée sur le comportement et la typicité des vins de l'Arvine. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **46** (4), 244-253.
- Thibon C., Cluzet S., Mérillon J.-M., Darriet P. & Dubourdiou D., 2011. 3-sulfanylhéxanol precursor biogenesis in grapevine cells: the stimulating effect of *Botrytis cinerea*. *J. Agric. Food Chem.* **59** (4), 1344-1351.
- Tominaga T., Baltenweck-Guyot R., Peyrot des Gachons C.P. & Dubourdiou D., 2000. Contribution of volatile thiols to the aromas of white wines made from several *Vitis vinifera* grape varieties. *Am. J. Enol. Vitic.* **51**, 178-181.
- 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 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. & 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.
- Verdenal T., Zufferey V., Spring J.-L., Jourjon M. & Viret O., 2012. Comportement du cépage Arvine dans le vignoble de Fully (Valais, Suisse). *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **44** (6), 378-384.
- Zufferey V., Spring J.-L., Verdenal T., Lorenzini F., Dienes-Nagy A., 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.
- Zufferey V., Spring J.-L., Verdenal T., Lorenzini F., Dienes-Nagy A., Belcher S., Koestel C., Rösti J., Spangenberg J. & Viret O., 2018. The Impacts of plant water status on gas exchange, berry composition and quality of Chasselas wines in Switzerland. *OENO One* **52**, 4, 333-347.
- Zufferey V., Verdenal T. & Spring J.-L., 2019. Indicateurs du statut hydrique de la vigne. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **51** (3), 190-195.

Summary

Effect of Water Balance on Vine Behaviour and Quality of Petite Arvine Wines.

From 2009 to 2016 an irrigation trial was conducted on Agroscope's experimental farm in Leytron to study the effect of vine water balance on physiological (gas exchange, vigour) and agronomic behaviour (yield components, grape composition), as well as on the quality of wines of the Petite Arvine grape variety. Reduced water supply to non-irrigated vines led to lower shoot vigour. Yield and its components (bud fertility, berry and cluster weight) were not heavily affected by vine water status. By contrast, nitrogen concentration in the must decreased with increasing water stress. Sugar- and aromatic precursor content (3-mercaptohexanol, P-3MH) was not influenced by vine water balance. Wines from vines suffering from a significantly reduced supply of water and assimilable nitrogen (non-irrigated vines in hot, dry vintage years) exhibited a less intense aroma and a lower typicality in their bouquet, as well as a higher bitterness in the mouth than wines from vines well supplied with water and nitrogen. In general, Petite Arvine wines, made from grapes well supplied with water and nitrogen, achieved higher sensorial ratings.

Keywords: irrigation, water stress, physiology of the vine, wine quality

Zusammenfassung

Auswirkungen des Wasserhaushalts von Reben auf deren Verhalten und die Qualität von Weinen der Rebsorte Petite Arvine.

Von 2009 und 2016 wurde ein Bewässerungsversuch auf dem Versuchsbetrieb in Leytron durchgeführt, um die Auswirkung des Wasserhaushalts der Rebe auf das physiologische (Gasaustausch, Wuchskraft) und agronomische (Ertragskomponenten, Zusammensetzung der Trauben) Verhalten sowie auf die Qualität der Weine der Rebsorte Petite Arvine zu untersuchen. Die reduzierte Wasserversorgung bei nicht bewässerten Reben führte zu einer geringeren Wuchskraft der Ranken. Der Ertrag und seine Komponenten (Fruchtbarkeit der Knospen, Beeren- und Traubengewicht) wurden durch den Wasserhaushalt der Reben nicht stark beeinflusst. Die Stickstoffkonzentration im Most nahm jedoch mit zunehmendem Wasserstress ab. Der Gehalt an Zucker und an aromatischen Vorläufern (3-Mercaptohexanol, P-3MH) wurde durch den Wasserhaushalt der Rebe nicht beeinflusst. Weine aus Reben, die unter einer stark reduzierten Versorgung an Wasser und assimilierbarem Stickstoff litten (nicht bewässerte Reben aus heißen und trockenen Jahren), zeigten ein weniger intensives Aroma und eine geringere Typizität im Bukett sowie höhere Bitterstoffe im Mund als Weine aus Reben, die gut mit Wasser und Stickstoff versorgt waren. Im Allgemeinen wurden Petite-Arviner-Weine, die aus Reben mit guter Wasser- und Stickstoffversorgung gemacht wurden, sensorisch besser bewertet.

Riassunto

Effetti del regime idrico sul comportamento della vite e sulla qualità dei vini Petite Arvine.

Dal 2009 al 2016 è stato condotto un test d'irrigazione nel vigneto sperimentale di Agroscope a Leytron per studiare gli effetti del regime idrico della vite sul comportamento fisiologico (scambi gassosi, vigore), agronomico (componenti della resa, composizione dell'uva) e qualitativo dei vini Petite Arvine. La limitazione di acqua osservata nelle viti non irrigate ha portato a un minor vigore dei rami. La resa e le sue componenti (fertilità delle gemme, peso degli acini e dei grappoli) non sono state influenzate in modo marcato dallo stato idrico della vite. La concentrazione di azoto nel mosto è invece diminuita all'aumentare dello stress idrico. Il contenuto di zuccheri e di precursori aromatici (3-mercaptoesanol, P-3MH) non sono stati influenzati dal regime idrico della vite. I vini provenienti da vitigni che avevano sofferto di un'elevata restrizione di acqua e di azoto assimilabile (viti non irrigate nelle annate calde e secche) denotavano una minore espressione aromatica e tipicità del bouquet, oltre a una più spiccata amarezza in bocca rispetto ai vini provenienti da viti con un buon quantitativo di acqua e azoto. In generale, l'apprezzamento sensoriale dei vini è stato migliore per la varietà Petite Arvine proveniente da vitigni ben forniti di acqua e azoto durante la stagione.