



HAL
open science

L'irrigation de précision de la vigne : méthodes, outils et stratégies pour maximiser la qualité et les rendements de la vendange en économisant de l'eau

Hernan Ojeda, Nicolas Saurin

► To cite this version:

Hernan Ojeda, Nicolas Saurin. L'irrigation de précision de la vigne : méthodes, outils et stratégies pour maximiser la qualité et les rendements de la vendange en économisant de l'eau. *Innovations Agronomiques*, 2014, 38, pp.97-108. <10.17180/n4p2-pr93>. <hal-02638961>

HAL Id: hal-02638961

<https://hal.inrae.fr/hal-02638961v1>

Submitted on 28 May 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

L'irrigation de précision de la vigne : méthodes, outils et stratégies pour maximiser la qualité et les rendements de la vendange en économisant de l'eau

Ojeda H., Saurin N.

UE 999 Unité Expérimentale de Pech Rouge, 11430 Gruissan, France

Correspondance : Hernan.Ojeda@supagro.inra.fr

Résumé

L'irrigation de la vigne est utilisée depuis très longtemps dans les vignobles dits du « nouveau monde » et elle y est largement pratiquée. Son adoption dans les régions méditerranéennes françaises est beaucoup plus récente et constitue une des premières adaptations des viticulteurs aux conséquences du changement climatique. Il s'agit d'un outil qu'il faut savoir maîtriser pour maintenir à la fois qualité et quantité de la vendange. Le pilotage de l'irrigation repose d'une part sur la maîtrise d'une technique de caractérisation de l'état hydrique de la vigne et d'autre part sur une connaissance des réponses de la plante à la contrainte hydrique en fonction de ses étapes phénologiques. Cette connaissance permettra de définir une stratégie d'irrigation adaptée à l'objectif du vignoble (jus de raisin, vins blanc, vins rouge, vins de garde...).

Mots-clés : vigne, déficit hydrique, irrigation, OAD, qualité, rendements.

Abstract: Precision irrigation of grapevines: methods, tools and strategies to maximize the quality and yield of the harvest and ensure water saving

Vineyard irrigation has been used for a very long time in the so-called "new world vineyards" and is widely practiced. Its adoption in the French Mediterranean regions is much more recent and is one of the first techniques adopted by the grapegrowers to combat the impact of climate change. It is a tool which makes it possible to maintain both quality and quantity of the harvest. Irrigation control is based on the characterization of vine water status and on the knowledge of plant response to water deficit according to the phenological stage. This knowledge helps in defining an irrigation strategy adapted to the vineyard objective (grape juice, white wines, red wines, wines for ageing...).

Keywords: grapevine, water deficit, irrigation, quality, yields.

1. La vigne et l'eau

Dans le monde, la vigne est cultivée dans des régions où le régime hydrique est très varié en fonction du climat (évapotranspiration et pluviométrie) et du type de sol (capacité de rétention en eau). Dans plusieurs régions viticoles des pays producteurs comme l'Australie, l'Argentine, les Etats-Unis (Californie) et le Chili, l'irrigation est une technique culturelle comme une autre, de plus en plus utilisée pour gérer le rendement et la qualité des raisins et des vins. Dans l'ensemble de ces pays dit du « Nouveau Monde Viticole », la surface viticole irriguée atteint les 580.000 ha, soit approximativement 83 % de la superficie viticole totale. En Argentine, la totalité de la superficie viticole est irriguée (205 000 ha).

Dans le sud de France, l'irrigation de la vigne est une réalité depuis le début des années 2000. Le Languedoc-Roussillon est la principale région irriguée en France avec 26.000 ha (11 % de la superficie viticole), suivi par la région PACA avec 10.000 ha de vigne irriguée¹. Cette surface est en augmentation car le changement climatique et la crise vitivinicole en cours imposent une adaptation évolutive des techniques culturales pour les vignobles méditerranéens. En effet, l'élévation des températures moyennes, accompagnée d'une augmentation significative de l'évapotranspiration, génèrent une sécheresse croissante au cours du cycle, qui est induite par un bilan hydrique fortement et précocement déficitaire (Figure 1).

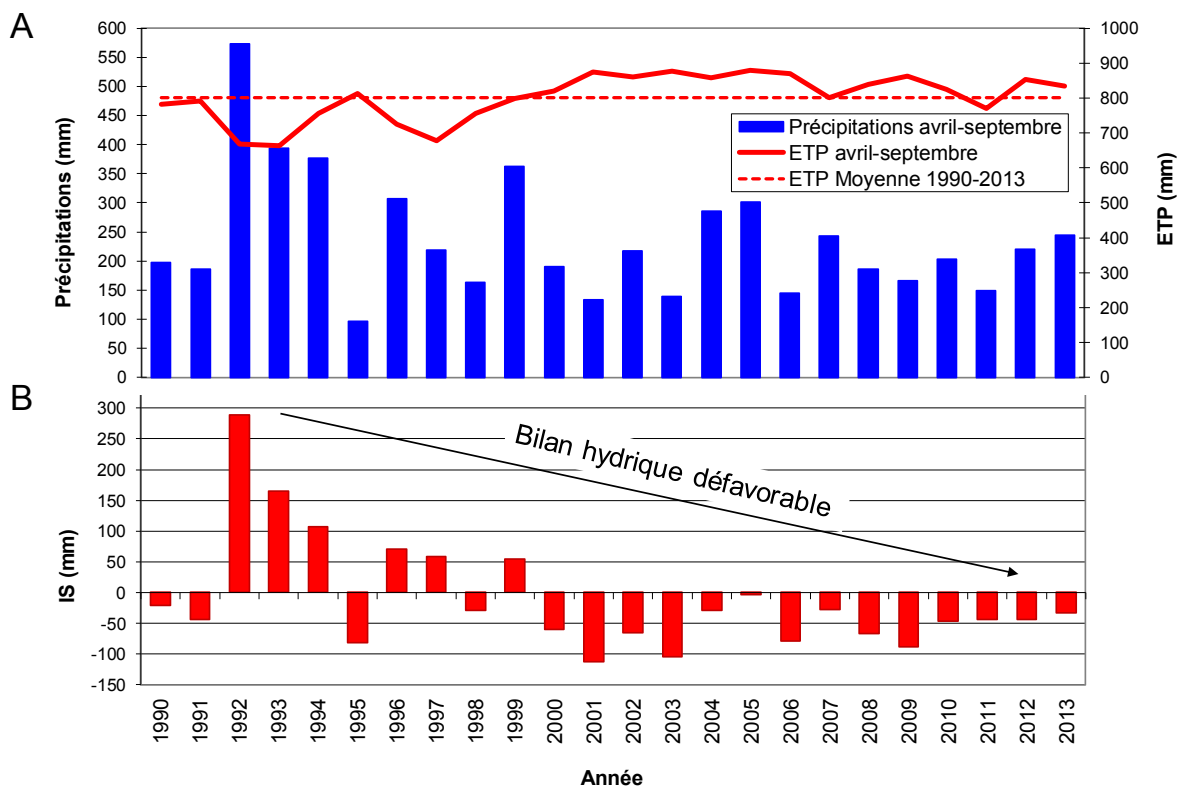


Figure 1 : A: Evolution de l'évapotranspiration potentielle totale (ETP) et des précipitations ; B: Evolution de l'Indice de Sécheresse (IS). Période avril – septembre. Années 1990-2013. INRA, Unité Expérimentale de Pech Rouge.

Les vigneron de la région sont de plus en plus confrontés au dilemme entre accepter les conséquences des contraintes hydriques sévères, ou irriguer pour contourner les graves problèmes de diminution des rendements et de la qualité des vendanges. Cette situation a incité la Région Languedoc-Roussillon à porter le projet Aqua Domitia, co-financé principalement par la Région et le Conseil Général de l'Aude, qui vise à élargir le réseau hydraulique régional en maillant les réseaux alimentés par le Rhône avec ceux alimentés par l'Orb, l'Hérault et l'Aude².

Dans ce contexte, une gestion raisonnée de l'irrigation doit s'appuyer sur une analyse quantitative des besoins en eau prenant en compte les caractéristiques pédoclimatiques des parcelles et les stratégies d'irrigation (demande) par rapport à un objectif de production donné, sur les possibilités d'approvisionnement (état des ressources) et, à plus long terme, prendre en compte l'évolution de cet équilibre dans un contexte de changement climatique (Figure 2).

¹ Source AIRMF Association des Irrigants des Régions Méditerranéennes Françaises

² http://www.reseau-hydraulique-regional.fr/presentation_du_projet-72.html

La maîtrise de l'irrigation pour le contrôle de la production et l'obtention d'une vendange de qualité devient donc une inquiétude constante de la profession qui demande, de plus en plus, des outils fiables et performants d'aide à la décision pour gérer l'état hydrique de la vigne.

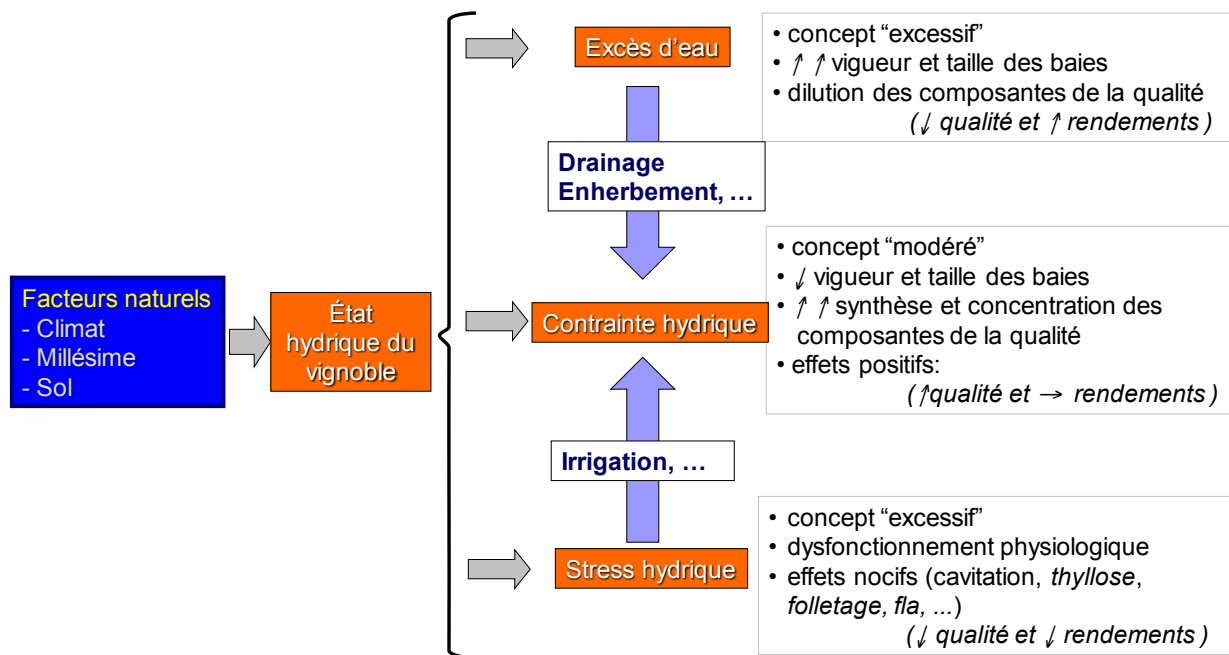


Figure 2 : Différentes situations et conséquences possibles de l'état hydrique du vignoble en fonction des caractéristiques naturelles des terroirs viticoles.

2. Les modes d'irrigation

Au niveau mondial, le mode d'irrigation utilisé traditionnellement pour la viticulture a été le gravitaire ou par submersion (Figure 3). Ceci a limité le développement de l'irrigation à des zones permettant la possibilité d'une systématisation de la distribution de l'eau, à un aménagement adéquat du terrain et à une disponibilité importante en eau, notamment à cause des hautes pertes par lixiviation (supérieures à 50%). L'incorporation des systèmes d'irrigation localisée, notamment l'arrosage par goutte-à-goutte, s'est intensifiée dans la viticulture mondiale depuis le début des années 90, principalement à cause de son aptitude à économiser l'eau et la précision de sa gestion. Actuellement, il s'agit du mode d'irrigation le plus répandu dans le monde.

Bien maîtrisée, la technologie d'irrigation localisée permet un meilleur contrôle de l'état hydrique du vignoble en assurant précision, économie et automatisation dans la gestion de l'eau. Il est aussi possible de pratiquer la fertirrigation, i.e. l'application de nutriments avec l'irrigation. Cependant, dans certains sols, la surveillance du taux de salinité au niveau du bulbe racinaire doit être une précaution permanente. De même que, dans certains sols sableux, une panne prolongée du système peut induire un dessèchement très accéléré du bulbe racinaire qui peut devenir catastrophique pour la vigne.

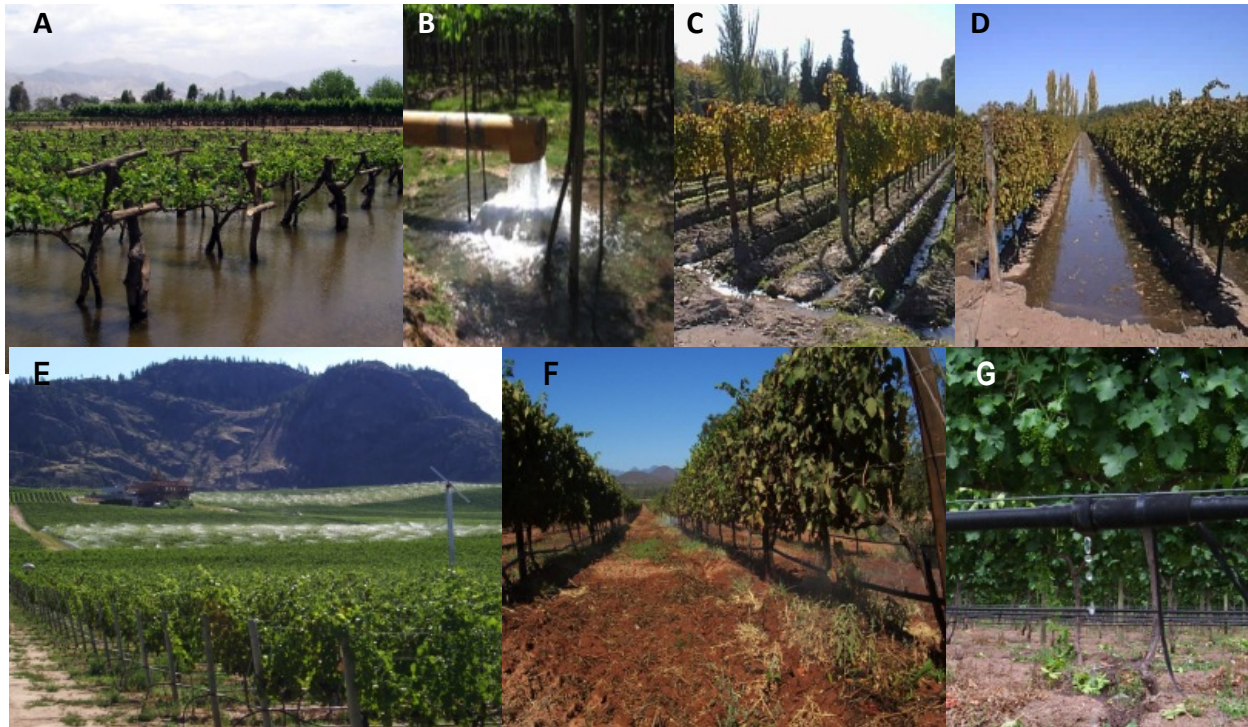


Figure 3 : Différents types d'irrigation utilisés pour la viticulture à niveau mondial.

A : par submersion dite « *en pozas* » (Ica, Pérou) ; **B** : par inondation « *californienne* » (Mendoza, Argentine) ; **C** : gravitaire par « *surcos* » ; **D** : gravitaire par « *melgas* » (Mendoza, Argentine) ; **E** : par aspersion (Osoyoos, Canada) ; **F** : par microaspersion (Stellenbosch, Afrique du Sud) ; **G** : par goutte-à-goutte (Argentine).

3. Méthodes d'aide à la décision

Plusieurs techniques directes ou indirectes pour l'estimation de l'état hydrique des plantes ou des ressources en eau disponibles ont été proposées pour la vigne. D'une façon générale, on peut les classer en deux grands groupes :

- **Des méthodes basées sur des mesures au niveau de la plante** : la conductance stomatique avec des potomètres ou des analyseurs d'échanges gazeux (Bravdo et Naor, 1996 ; Flexas *et al.*, 2002 ; Cifre *et al.*, 2005 ; Loveys *et al.*, 2005) ; le potentiel hydrique foliaire avec la chambre à pression (McCutchan et Shackel, 1992 ; Schultz, 1996 ; Choné *et al.*, 2001 ; Carbonneau *et al.*, 2004 ; Girona *et al.*, 2006 ; Sibille *et al.*, 2007) ; la transpiration avec des capteurs de flux de sève (Yunusa *et al.*, 2000 ; Fernandez *et al.*, 2001 ; Escalona *et al.*, 2002 ; Cifre *et al.*, 2005 ; Saurin *et al.*, 2011) ; la mesure du potentiel hydrique de la plante avec l'utilisation d'hygromètres sur la tige (Dixon et Tyree, 1984 ; Hessdörfer *et al.*, 2013) ; la dendrométrie pour contrôler les fluctuations de diamètre du tronc (Loveys *et al.*, 2001 ; Naor et Cohen, 2003 ; Cifre *et al.*, 2005) ; la température de la feuille et de la canopée (Idso, 1982 ; Sinclair *et al.*, 1984 ; Jones, 1999 ; Jones *et al.*, 2002) ; la détermination du rapport isotopique $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ chez le raisin (Van Leeuwen *et al.*, 2001 ; Gaudillère *et al.*, 2002).

- **Des méthodes non basées sur des mesures directes sur la plante** : l'estimation de l'évapotranspiration de la culture à partir de données climatiques (Sammis *et al.*, 1988 ; Allen *et al.*, 1989 ; Pereira *et al.*, 1999 ; McCarthy, 1997) ; la disponibilité en eau du sol (McCarthy, 1997 ; Lebon *et al.*, 2003 ; Peregrino *et al.*, 2004, 2006 ; Loveys *et al.*, 2005) ; l'utilisation de capteurs d'humidité du sol (tensiomètres, résistance électrique, sondes neutroniques, sondes FDR et TDR,...) (Topp *et al.*, 1980 ; Ortega-Farías et Acevedo, 2004 ; Loveys *et al.*, 2005) ; ou le calcul d'indices basés sur une ou plusieurs méthodes (McCarthy, 1997 ; Colaizzi *et al.*, 2003 ; Ortega-Farías *et al.*, 2004).

Parmi cette disponibilité des outils et méthodes pour l'estimation de l'état hydrique des plantes ou des ressources en eau disponibles pour la vigne, il faut toujours privilégier si possible la décision sur des mesures à partir de l'interprétation du fonctionnement physiologique de la plante car elle intègre l'ensemble des paramètres responsables de l'état hydrique du vignoble (ETP, pluies, type de sol, pratiques culturales, ...).

La technique de référence incontestable est toujours le potentiel hydrique foliaire (Carbonneau, 1998 ; Choné *et al.*, 2001 ; Ojeda *et al.*, 2001 ; Williams et Araujo, 2002 ; Deloire *et al.*, 2004) qui a été progressivement adoptée par les entreprises vitivinicoles en tant que méthode d'aide à la décision pour l'irrigation (Figure 4). Le potentiel hydrique foliaire, qui se détermine avec une chambre à pression (Scholander *et al.*, 1965), a permis d'établir des seuils de référence solides, valables à l'échelle internationale et pour différentes situations agroclimatiques et particulièrement pour les valeurs du potentiel de base.

D'autres techniques plus pertinentes dans un contexte spécifique, plus économiques ou faciles à mettre en œuvre peuvent être utiles à condition d'être rapprochées des références acquises avec le potentiel hydrique foliaire.



Figure 4 : Détermination de l'état hydrique de la vigne avec la chambre à pression

4. L'état hydrique et les effets sur la vigne

L'irrigation est un outil agronomique majeur pour contrôler l'état hydrique du vignoble en fonction des caractéristiques de la parcelle, du millésime et des objectifs de production. Pour sa correcte gestion, il est nécessaire de connaître précisément les réponses de la plante à la contrainte hydrique en fonction de ses différentes étapes phénologiques.

Pendant la période du débourrement à la floraison, la croissance de rameaux est prioritaire. La croissance végétative est affectée en priorité en cas de déficience hydrique. En effet, la croissance des rameaux diminue, voire s'arrête, à des niveaux de contrainte relativement faibles, qui n'affectent pas les paramètres physiologiques comme la photosynthèse ou la transpiration (Williams *et al.*, 1994). En conséquence, pendant cette période, il est nécessaire que la vigne ne soit pas affectée par des contraintes hydriques importantes pour que la croissance des rameaux se produise de façon normale et que le développement de la surface foliaire se fasse grâce à une bonne alimentation hydrique des racines.

Entre la nouaison et la véraison, l'état hydrique a une forte influence sur le rendement au travers de l'effet sur la taille des baies (Becker et Zimmermann, 1984 ; McCarthy, 1997 ; Ojeda *et al.*, 2001). La diminution contrôlée de la taille de la baie peut être un des objectifs de qualité en sachant que la dimension des baies conditionne le rapport surface/volume et par la suite la dilution des constituants spécifiques de la pellicule, notamment les phénols et précurseurs d'arômes, dans le volume de moût ou de vin (Singleton, 1972 ; Cordonnier, 1976 ; Ojeda *et al.*, 2002). L'assimilation en nutriments peut aussi être affectée si la sécheresse est importante pendant cette période. Elle ne peut se faire correctement que si les éléments minéraux sont dilués dans une solution hydrique facilement explorable par les racines (Keller, 2005), et ce pour une période de consommation maximale d'azote, de potassium, de phosphore, et de calcium qui se situe, majoritairement, entre la nouaison et la véraison (Fregoni, 1985).

L'absence de contrainte hydrique durant l'étape de maturation du raisin, entre véraison et récolte, favorise rendements élevés et vigueur estivale. Les composants qualitatifs comme les polyphénols et les sucres sont dilués par l'effet de l'augmentation de la taille des baies (Ojeda *et al.*, 2002). Donc c'est une situation à éviter pour la production de vins mais à favoriser dans le cas d'objectifs de production différents comme dans le cadre de la production de moût concentré ou de jus de raisin.

Une contrainte hydrique progressive durant la période de maturation est propice à une réduction de la taille des baies, et par conséquent à celle du rendement, ce qui favorise aussi la concentration des composés phénoliques, principalement les anthocyanes (Ojeda *et al.*, 2002). La stimulation des métabolismes secondaires est aussi associée ; néanmoins les seuils optimaux de contrainte hydrique sont vraisemblablement différents lorsqu'il s'agit de favoriser les phénols ou les précurseurs d'arômes. En effet, ces derniers sont plus sensibles aux fortes contraintes hydriques (Peyrot des Gachons *et al.*, 2005 ; Tejerina *et al.*, 2013) donc à éviter lorsque les arômes sont une priorité, notamment pour les vins blancs.

L'état hydrique du vignoble durant la période véraison-récolte détermine en grande partie le type de vin produit (Deloire *et al.*, 2005). En cas d'absence totale de contrainte hydrique, on produit des vins herbacés, dilués et acides. Dans le cas d'une contrainte hydrique très sévère, les vins rouges seront excessivement tanniques, durs, astringents et alcooleux, alors que les vins blancs auront perdu une grande partie de leurs arômes au-delà d'une première situation de sur-maturité qui peut être recherchée pour certains produits.

Après la récolte, il est important que la vigne revienne à un état hydrique non contraint pour ne pas perturber son métabolisme actif durant cette période. En effet, le cep, exempt de grappes, oriente la photosynthèse vers les zones de réserves (racines, tronc et sarments) (Champagnol, 1984), augmente l'assimilation des minéraux (Conradie, 2005) et reprend, dans certains cas, la production des nouvelles racines (Freeman et Smart, 1976 ; Van Zyl, 1984).

En résumé, pendant la période de maturation du raisin située entre la véraison et la récolte, au fur et à mesure que les niveaux de contrainte hydrique augmentent, la richesse en composants liés à la qualité (phénols, précurseurs d'arômes, sucres,...) est renforcée malgré une réduction du rendement notamment par diminution de la taille de la baie (Figure 5).

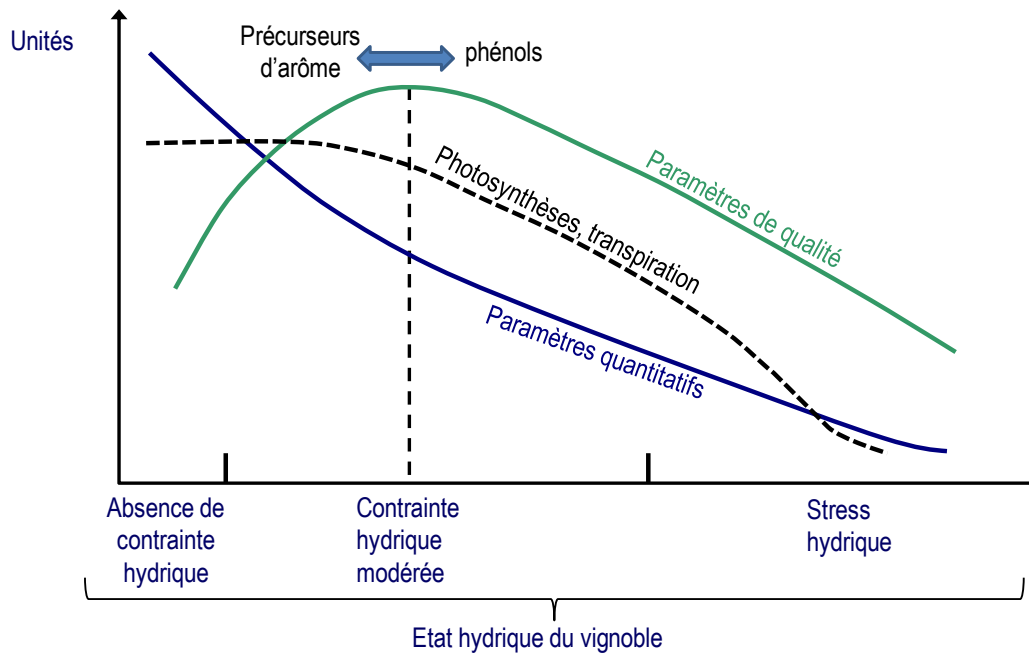


Figure 5 : Influence de l'état hydrique sur les paramètres qualitatifs, quantitatifs et physiologiques du vignoble.

Néanmoins à partir d'un certain seuil de contrainte hydrique, qu'on peut considérer comme optimum, le raisin ne gagne plus en composants dits «qualitatifs» tandis que les paramètres physiologiques (photosynthèse, conductance stomatique, transpiration) et quantitatifs (croissance végétative, rendements, ...) continuent à diminuer. Ce seuil de contrainte hydrique optimum, varie en fonction du paramètre qualitatif à privilégier, notamment les composants phénoliques (vins rouges) ou les précurseurs d'arôme (vins blancs). Les niveaux de stress hydriques plus sévères provoquent une forte réduction des paramètres qualitatifs, quantitatifs et physiologiques et amènent à un fort affaiblissement des souches qui peuvent entraîner des problèmes de survie pour certains cépages si cette situation persiste pendant plusieurs millésimes successifs.

Ces résultats justifient l'intérêt d'approfondir les travaux de recherche afin d'établir les seuils de contrainte hydrique optimum pour chaque situation cépage/système de conduite/terroir avec le meilleur rapport qualité/rendement vis-à-vis de la maîtrise d'une "irrigation qualitative". Il faut en parallèle, étudier les aspects physiologiques qui expliquent les mécanismes d'adaptation des différents cépages aux caractéristiques hydriques des différents terroirs dans un contexte de réchauffement climatique. Dans ce sens, des contributions importantes sont déjà disponibles pour établir des courbes de réponses physiologiques (photosynthèse, transpiration, conductance stomatique, ...) par rapport aux différents niveaux de contrainte hydrique en (Prieto *et al.*, 2012).

5. Stratégies d'irrigation

Des modèles pour gérer l'irrigation en fonction d'un état hydrique optimal pour la vigne par rapport au cycle végétatif et à l'intensité de la contrainte hydrique ont été proposés (Ojeda, 2007, 2008).

Sur cette base, des stratégies d'irrigation ont commencé à être appliquées dans différentes régions viticoles du monde et des sociétés commencent à proposer des services et des outils pour aider et accompagner les producteurs dans la mise en œuvre de ces stratégies ^(3,4,5).

On peut envisager différentes alternatives possibles d'intervention pour une stratégie d'irrigation en fonction de l'objectif du vignoble, leur période végétative et le degré de la contrainte hydrique (Figure 6).

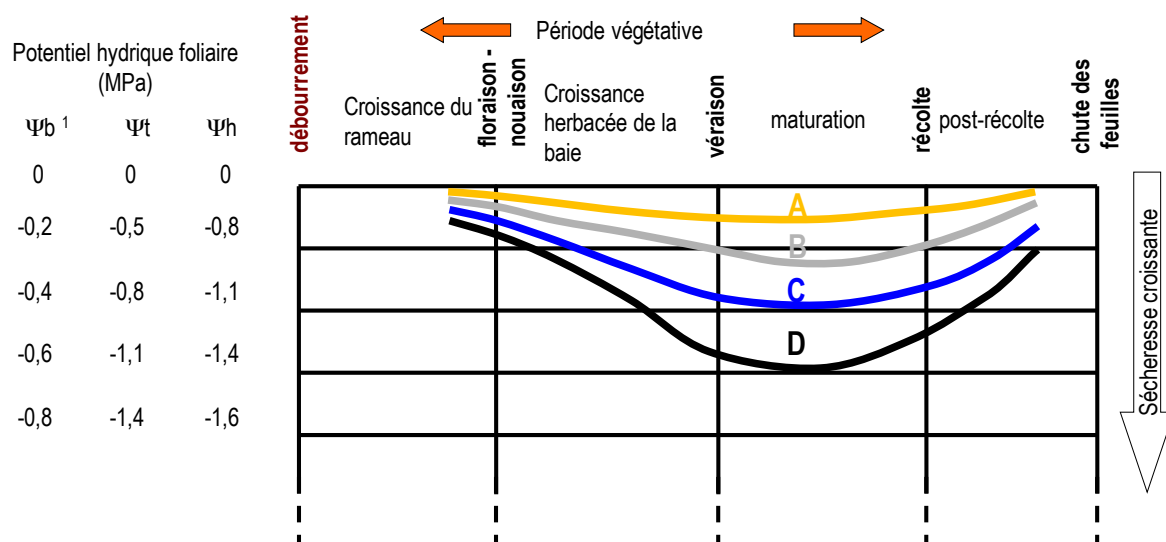


Figure 6 : Différentes stratégies d'irrigation possibles pour contrôler l'état hydrique du vignoble en fonction de la période végétative et du type de produit recherché : (A) moûts concentrés, jus de raisin, vins de table et jeunes vignobles en formation; (B) vins blancs, vins rouges légers, fruités; (C) vins jeunes de qualité, équilibrés mais avec prédominance du fruit sur la structure, seuils limites pour les vins blancs et (D) vins de qualité, concentrés, équilibrés et aptes pour le vieillissement. ¹ potentiel hydrique de base (Ψ_b), potentiel de "tige" au zénith (Ψ_t), potentiel de feuille au zénith (Ψ_f)

Ainsi, pour un vignoble orienté vers la production de jus de raisin, avec pour but une production élevée à l'hectare, la stratégie d'irrigation à suivre sera d'éviter une contrainte hydrique pendant la totalité de la période végétative (Figure 6A) pour favoriser des rendements élevés au travers de la plupart de ses composantes. Cette même stratégie est à suivre en général pour la production de vins de table ou pour les jeunes vignobles.

Pour un vignoble dont le but est de produire un vin blanc aromatique ou un vin rouge fruité, on pilotera l'irrigation en vue d'une contrainte hydrique légère et progressive vers la fin de la période véraison-maturité (Figure 6B) pour ne pas affecter significativement la taille des baies et la photosynthèse, favoriser l'accumulation de sucres et surtout celles des précurseurs d'arômes tout en contrôlant la croissance végétative.

Pour des vins plus concentrés, on recherchera une contrainte hydrique modérée et progressive vers la période de maturation afin de favoriser une réduction de la taille des baies, et par conséquent des rendements, et favoriser la concentration et la synthèse des composés phénoliques, notamment les anthocyanes (Figure 6C).

Une autre option pour les vins rouges est d'atteindre une contrainte hydrique forte (Figure 6D), pour assurer un plus fort contrôle de la taille des baies, une augmentation significative de la concentration en phénols (davantage de couleur et de structure) malgré une certaine diminution d'intensité aromatique.

³ <http://itkweb.com/solutions/itk-vigne>

⁴ <http://www.fruitionsociences.com/fr/login/irrigation>

⁵ <http://www.vivervys.com/vivervys-system-vigne.html>

Cette stratégie est très adaptée pour les vins de garde mais elle est déconseillée pour les vins blancs dont la composante aromatique est à privilégier.

La maîtrise de l'eau vis à vis du modèle de contrôle de l'état hydrique choisi peut s'avérer très difficile dans certaines situations extrêmes. Dans les zones à sols profonds, à texture argileuse, à forte teneur en azote et à drainage médiocre, la stratégie doit s'orienter vers le contrôle de l'excès de rétention en eau dans le profil au travers de l'entretien du sol, de l'utilisation de l'enherbement et de la conduite du vignoble. Lorsque le sol est sableux ou sablo-limoneux avec un bon drainage, le risque de stress hydrique est élevé, il convient donc de surveiller régulièrement l'état hydrique du vignoble pour prévenir ce risque.

En fonction de la stratégie choisie, il est convenable de maintenir le vignoble à des niveaux proches des optimums de contrainte hydrique pendant toute la période végétative pour assurer le maximum de profit et s'éloigner des problèmes provoqués par l'excès d'eau ou la sécheresse.

Références bibliographiques

Allen R.G., Jensen M.E., Wright J.L., Burman R.D., 1989. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agronomy Journal* 81, 650-662.

Becker N., Zimmermann H., 1984. Influence de divers apports d'eau sur des vignes en pots, sur la maturation des sarments, le développement des baies et la qualité du vin. *Bull. O. I. V.* 573-583.

Bravdo B., Naor A., 1996. Effects of water regime on productivity and quality of fruit and wine. *Proc. Workshop Strategies to Optimize Wine Grapes Quality. Acta Hort. (ISHS)* 427,15-26.

Carbonneau A., Deloire A., Constanza P., 2004. Leaf water potential meaning of different modalities of measurements. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 38,15-19.

Carbonneau A., 1998. Irrigation, vignoble et produit de la vigne. In : *Traité d'Irrigation*. J.-R. Tiercelin, coord.. Paris, Lavoisier Tec & Doc. Chapitre IV: Aspects Qualitatifs, pp. 257-298.

Champagnol F., 1984. *Eléments de Physiologie de la vigne et de viticulture générale*. Montpellier, 315 p. Impr. Déhan.

Choné X., Van Leeuwen C., Dubourdiou D., Gaudillere J.P., 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany* 97 (4), 477-483.

Cifre J., Bota J., Escalona J.M., Medrano H., Flexas J., 2005. Physiological tools for irrigations scheduling in grapevines (*Vitis vinifera* L.). An open gate improve water-use efficiency? *Agriculture, Ecosystems and Environmental* 106,159-170.

Colaizzi P.D., Barnes E.M., Clarke T.R., Choi C.Y., Waller P.M., 2003. Estimating soil moisture under low frequency surface irrigation using crop water stress index. *Journal and Irrigation and Drainage Engineering* 129, 27-35.

Conradie W.J., 2005. Partitioning of mineral nutrients and timing of fertilizer applications for optimum efficiency. In *Proceedings of the Soil Environment and Vine Mineral Nutrition Symposium*. P.Christensen and DR Smart (Eds.), pp. 69-81. American Society for Enology and Viticulture, Davis, CA.

Cordonnier R., 1976. Qualité de la vendange et méthodologie de la sélection viticole. *Le Progrès Agricole et Viticole* 93 (24), 760-762.

Deloire A., Ojeda H., Zebic O., Bernard N., Hunter J.-J., Carbonneau A., 2005. Influence of grapevine water status on the style of wine. *Le Progrès Agricole et Viticole* 122 (21), 455-462, 2005.

Dixon M.A., Tyree M.T., 1984. A new stem hygrometer, corrected for temperature gradients and calibrated against the pressure bomb. *Plant, Cell and Environment* 7, 693-697

- Escalona J.M., Flexas J., Medrano H., 2002. Drought effects on water flow, photosynthesis and growth of potted grapevines. *Vitis* 41, 57-62.
- Fernandez J.E., Palomo M.J., Diaz-Espejo A., Clothier B.E., Green S.R., Giron I.F., Moreno F., 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management* 51, 99-123.
- Flexas J., Bota J., Escalona J.M., Sampol B., Medrano H., 2002. Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions: an evaluation of stomatal and mesophyll limitations. *Funct. Plant Biol* 29, 461-471.
- Freeman B.M., Smart R.E., 1976. A root observation laboratory for studies with grapevines. *Amer. J. Enol. Vitic.* 27 (1), 36-39.
- Fregoni M., 1999. *Viticultura di qualità*. Edizioni l'Informatore Agrario S.R.L. Verona, Italia.
- Gaudillère J.P., Van Leeuwen C., Ollat N., 2002. Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *Journal of Experimental Botany* 53 (369), 757-763.
- Girona J., Mata M., Del Campo J., Arbone A., Bartra E. and Marsal J., 2006. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrig. Sci* 24, 115-117.
- Hesdörfer, D., Scwab A.B., Gruber B.R., 2013. Continuous measurement of grapevine water status in an irrigated vineyard under changing weather conditions. *Proceedings of the 18th International Symposium Giesco, Porto, Portugal, 7-11 juillet 2013*
- Idso S.B., 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* 27, 59-70.
- Jones H.G., 1999. Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant, Cell and Environment* 22, 1043-1055.
- Jones H.G., Stoll M., Santos T., De Sousa C., Chavez M., Grant O.M., 2002. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany* 53, 2249-2260.
- Keller M., 2005. Déficit irrigation and vine mineral nutrition. *Am. J. Enol. Vitic.* 56 (3), 267-283.
- Lebon E., Dumas V., Pieri P., Schultz H.R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Funct. Plant. Biol* 30, 699-710.
- Loveys B.R., Stoll M., Dry P.R., McCarthy M.G., 2001. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. *Acta Hort. (ISHS)*, 537, 187-197.
- Loveys B.R., McCarthy M., Jones H.G., Theobald J., Skinner A., 2005. When to water? Assessment of plant-based measurements to indicate irrigation requirements. Final Report to grape and wine research & development corporation. CSIRO Plant Industry, p. 111.
- McCarthy M.G., 1997. The effect of transient water deficit on berry development of cv. Shiraz. (*Vitis vinifera* L.). *Australian Journal of Grape and Wine Research* 3, 102-108.
- McCutchan H., Shackel K., 1992. Stem-Water Potential as a sensitive indicator of water stress in Prune Trees (*Prunus domestica* L. Cv. French). *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117, 607-611.
- Naor A., Cohen S., 2003. Sensitive and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field-grown apple trees. *HortScience* 38, 547-551.
- Ojeda H., Deloire A., Carbonneau A., 2001. Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis* 40 (3), 141-145.
- Ojeda H., Andary C., Kraeva E., Carbonneau A., Deloire A., 2002 - Influence of pre and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* L., cv Shiraz. *Am. J. of Enol. and Vitic.* 53 (4), 261 – 267.
- Ojeda H., 2008. Stratégies d'irrigation en fonction des particularités et les objectifs du vignoble. *Cahier Technique Revue Française d'œnologie* 229.
- Ojeda H., 2007. Irrigation qualitative de précision de la vigne. *Le Progrès Agricole et Viticole* 7, 133-141.

- Ortega-Farias S., Acevedo C., 2004. Irrigation Scheduling in Vineyards (VIIth Region of Chile) by Using Time Domain Reflectometry. *Acta Hort (ISHS)* 646, 115-119.
- Ortega-Farias S., Duarte M., Acevedo C., Moreno Y., Cordova F., 2004. Effect of four levels of water application on grape composition and midday stem water potential of *Vitis vinifera* L. Cv. Cabernet Sauvignon. *Acta Hort. (ISHS)* 664, 491-497.
- Pellegrino A., Lebon E., Voltz M., Wery J., 2004. Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant and Soil* 266, 129-142.
- Pellegrino A., Gozé E, Lebon E, Wery J., 2006. A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in a network of farmers fields. *European Journal of Agronomy* 25, 49-59.
- Pereira L.S., Perrier A., Allen R.G. and Alves I., 1999. Evapotranspiration: review of concepts and future trends. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*, 125, 45-51.
- Peyrot des Gachons C., Tominaga T., Dubourdiou D., 2002b. Sulfur aroma precursor present in S-glutathione conjugate form: Identification of S-3-(hexan-1-ol)-glutathione in must from *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon Blanc. *J. Agric. Food Chem.* 50, 4076–4079.
- Prieto J., Louarn G. Perez Peña J., Ojeda H., Simonneau T., Lebon E., 2012. A leaf exchange model that account for intra-canopy variability by considering leaf nitrogen content and local acclimation to radiation in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Plant Cell & Environment* 35 (7), 1313-1328.
- Sammis T.W., Rirey W.R., Lugg D.G., 1988. Crop water stress index of pecan. *Applied Engineering in Agriculture* 4, 39-45.
- Saurin N., Ojeda H., Lucero E., Mondjou R., Scholasch T., 2011. New Approach for Grapevine Irrigation Scheduling Using Sap Flow Sensors: Relationship with Predawn Leaf Water Potential. *American Journal of Enology and Viticulture* 62 (3), 411A.
- Schultz H.R., 1996. Water relations and photosynthetic responses of two grapevine cultivars of different geographical origin during water stress. *Acta Hort. (ISHS)* 427, 251–266.
- Sibille I., Ojeda H., Prieto J., Maldonado S., Lacapere J-N., Carbonneau A., 2007. Relation between the values of three pressure chamber modalities (midday leaf, midday stem and predawn water potential) of 4 grapevine cultivars in drought situation of the southern of France. Applications for the irrigation control. *Proceedings of XV International Symposium of GESCO: 685-695, Porec – Croatia, 20-23 /6/07.*
- Sinclair T.R., Tanner C.B., Bennett J.M., 1984. Water use-efficiency in cop production. *Bioscience* 34, 36-40.
- Singleton V.L., 1972. Effects on red wine quality of removing juice before fermentation to simulate variation in berry size. *Amer. J. Enol. Vitic.* 23 (3), 106-113.
- Scholander P.F., Hammel H.T., Brandstreet E.T., Hemmingsen E.A., 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148, 339-346.
- Tejerina M., Velado D., Hernandez E., Puxeu M., Ojeda H., 2013. Influence of water deficit on plant physiology, grape aromatic precursors and wine quality of White Grenache. *Proceedings of the 18° International Symposium Giesco, Porto, Portugal, 7-11 juillet 2013, pp 500-504.*
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Res* 16, 574-582.
- Van Leeuwen C, Gaudillere JP, Tregoat O, 2001. The assessment of vine water uptake conditions by C-13/C-12 discrimination in grape sugar. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 35, 195-205.
- Van Zyl J.K., 1984. Reponse of colombar grapevines to irrigation as regards quality aspects and growth. *S. Afr. Enol. Vitic.* 5 (1), 19-28.
- Williams L.E., Araujo F.J., 2002. Correlation among predawn leaf, midday leaf, and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in *Vitis vinifera*. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 127 (3), 448 – 454.

Williams L. E., Dokoozlian N. K., Wample R., 1994. Grape. In : B. Shaffer and P. Andersen (Eds.), Handbook of Environmental Physiology of fruit crops. Vol. I. Temperature crops. CRC Press, Inc. Florida - USA. pp. 85-133.

Yunusa I.A.M., Walker R.R., Loveys B.R., Blackmore D.H., 2000. Determination of transpiration in irrigated grapevines: comparison of the heat-pulse technique with gravimetric and micrometeorological method. *Irrigation Science* 20, 1-8.