



HAL
open science

Alimentation hydrique de la vigne et qualité des raisins

Cornelis van Leeuwen, Philippe P. Vivin

► **To cite this version:**

Cornelis van Leeuwen, Philippe P. Vivin. Alimentation hydrique de la vigne et qualité des raisins. Innovations Agronomiques, 2008, 2, pp.159-167. 10.17180/te5h-c246 . hal-02653567

HAL Id: hal-02653567

<https://hal.inrae.fr/hal-02653567>

Submitted on 29 May 2020

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

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



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

Alimentation hydrique de la vigne et qualité des raisins

Cornelis van Leeuwen¹, Philippe Vivin²

¹ ENITA, UMR EGFV, ISVV Bordeaux, BP 81, 33883 Villenave d'ornon, France

² INRA, UMR EGFV, ISVV Bordeaux, BP 81, 33883 Villenave d'ornon, France

d'après les travaux de Xavier Choné, Olivier Tregoat, Marie-Eve Jaeck, Sébastien Rabusseau et Jean-Pierre Gaudillère

Résumé

Le développement de la vigne et la maturation du raisin sont fortement influencés par le régime hydrique. Ce dernier dépend à la fois des réserves en eau du sol, de paramètres climatiques (précipitations, ETP) et de l'architecture de la végétation. Pour une conduite raisonnée de la vigne, il est important de connaître son niveau d'alimentation en eau. Pendant longtemps celle-ci a été suivie au niveau du sol, soit à l'aide de tensiomètres pour connaître la disponibilité de l'eau dans le sol, soit à l'aide d'humidimètres à neutrons pour évaluer les quantités d'eau prélevées dans le sol par la vigne dans le but d'établir des bilans hydriques. Des bilans hydriques peuvent également être obtenus par modélisation. De plus en plus on évalue l'état hydrique de la vigne à partir d'indicateurs physiologiques. Parmi celles-ci on peut citer les potentiels hydriques et la discrimination isotopique mesurée sur les sucres du moût à maturité. La contrainte hydrique réduit la photosynthèse, favorise l'arrêt de croissance, limite la taille des baies et stimule la synthèse des composés phénoliques. Une contrainte hydrique modérée augmente la vitesse de maturation malgré la limitation de la photosynthèse, à cause d'une moindre compétition pour le carbone (arrêt de croissance) et d'un volume plus faible de raisin à remplir. Elle est ainsi un facteur important de précocité. Une forte contrainte hydrique peut rester favorable au potentiel œnologique des cépages noirs, surtout si le niveau de rendement est faible, alors qu'elle est presque toujours pénalisante pour les cépages blancs. Le viticulteur peut agir sur le régime hydrique à travers le choix du matériel végétal (cépage et porte-greffe), le système de conduite (notamment la surface foliaire) et l'entretien du sol. Dans des conditions pédo-climatiques particulièrement sèches, et lorsque la législation le permet, il peut avoir recours à l'irrigation. Cette technique est avant tout un facteur d'augmentation du rendement. Dans certaines situations, lorsqu'elle permet d'éviter un stress hydrique sévère tout en maintenant un déficit hydrique modéré, elle peut également être un facteur de qualité.

Introduction

Selon un vieil adage « la vigne doit souffrir pour produire des raisins de qualité ». Reste à savoir de quoi et dans quelles limites... A la différence de la plupart des productions végétales, et notamment des cultures annuelles, la vigne est généralement cultivée en dessous de l'optimum agronomique, notamment dans des sites réputés pour la qualité du vin produit. Il est admis que différents types de contraintes environnementales peuvent limiter la vigueur et le rendement et favoriser le potentiel œnologique du raisin. Parmi ces contraintes, la limitation de l'alimentation en eau joue un rôle important sur le comportement de la vigne et la composition des baies. Un régime hydrique modérément limitant induit généralement des effets bénéfiques sur la qualité des vins produits ; on parle dans ce cas de « contrainte hydrique ». L'expression « stress hydrique » doit être réservée à des situations où un manque d'eau excessif altère la qualité du raisin ou met en péril la pérennité de la vigne.

Appréciation de l'état hydrique de la vigne

De nombreux facteurs influent sur l'état hydrique de la vigne. L'offre naturelle (sans irrigation) est assurée essentiellement par la réserve en eau utilisable du sol (RU) qui dépend, entre autres, de la profondeur de sol exploré par les racines, de sa texture et de sa structure (éventuellement de la présence d'une nappe d'eau perchée, du ruissellement,...), et par le mésoclimat (pluviométrie sur la parcelle). La demande découle de l'évapotranspiration de la plante et du sol, elle-même étroitement dépendante de la dimension du couvert végétal (densité de plantation, surface foliaire,...), des caractéristiques du cépage et des porte-greffe, de la couverture du sol et de la pression d'évaporation de l'atmosphère.

Il existe de nombreuses techniques pour évaluer le régime hydrique de la vigne (Van Leeuwen *et al.*, 2001a ; Van Leeuwen, 2003). Les plus anciennes sont basées sur la mesure de la quantité d'eau dans le sol (gravimétrie ou humidité à neutrons) ou de sa disponibilité pour la plante (tensiométrie) (Seguin, 1970). Le bilan hydrique théorique constitue une autre approche du régime hydrique de la vigne, par modélisation (Riou et Lebon, 2000 ; Lebon *et al.*, 2003). Il propose de simuler le stock d'eau restant dans le sol à chaque instant de l'été à partir de données concernant le stock d'eau au début de la saison, auquel on ajoute les apports (précipitations) et retranche les pertes (évapotranspiration). Il présente l'avantage de discriminer le degré de contrainte hydrique à travers trois composantes : l'époque, la durée et l'intensité. La principale difficulté de cette approche concerne l'estimation du stock d'eau au début de la saison, qui est extrêmement difficile à estimer à cause de particularités propres à la culture de la vigne (profondeur d'enracinement, sols caillouteux).

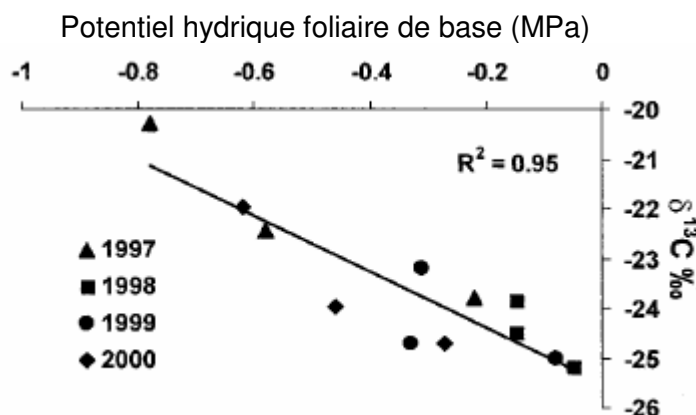


Figure 1. Corrélation entre le potentiel hydrique foliaire de base (valeur minimale en août) et la discrimination isotopique du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) mesurée sur les sucres du moût de Merlot à maturité (d'après Gaudillère *et al.*, 2002).

Au vu de la difficulté à raisonner le régime hydrique de la vigne à partir de mesures réalisées dans le sol, ou par modélisation, il est apparu séduisant d'aborder ce problème en effectuant des mesures directement sur la plante. Un déficit hydrique provoquera un certain nombre de modifications dans le fonctionnement physiologique de la vigne, qui sont mesurables : variations de la tension de la sève xylémienne, fermeture stomatique, déroulement de la photosynthèse... Lorsque la plante est utilisée comme indicateur de son propre état hydrique, on parle « d'indicateurs physiologiques ». Ceux-ci sont nombreux : potentiel foliaire, potentiel de base ou potentiel tige (Choné *et al.*, 2001a), micro-variations de diamètre d'organes de la vigne (Van Leeuwen *et al.*, 2000), débit de sève (Valancogne et Nasr, 1989) et transpiration. La mesure des potentiels foliaires ou de la transpiration peuvent mettre en évidence l'état hydrique instantané de la vigne avec une grande précision, mais l'extrapolation des

conditions de l'alimentation en eau de la vigne sur l'ensemble de la saison nécessite des mesures répétées sur le terrain.

La discrimination isotopique du carbone 13 (appelée $\delta^{13}\text{C}$) est un autre indicateur physiologique du régime hydrique. Le ^{13}C représente un peu plus de 1% du carbone dans le CO_2 atmosphérique. Le ^{12}C , plus léger, est préférentiellement utilisé lors de la photosynthèse. La contrainte hydrique, en provoquant la fermeture des stomates pendant une partie de la journée, ralentit les échanges de CO_2 entre la feuille et l'atmosphère et limite ainsi la discrimination isotopique. Le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ se rapproche, dans ces conditions, de celui du CO_2 atmosphérique. La mesure du $\delta^{13}\text{C}$ sur les sucres du moût à maturité constitue alors un indicateur global de la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la période de maturation (figure 1). L'intérêt de cet indicateur réside dans le fait que sa mesure ne nécessite pas d'intervention sur le terrain autre que le prélèvement de raisin à maturité (Van Leeuwen *et al*, 2001b, Gaudillère *et al*, 2002). Il devient alors possible d'échantillonner un grand nombre de parcelles à un coût réduit, ce qui n'est pas possible avec une chambre à pression (figure 2).

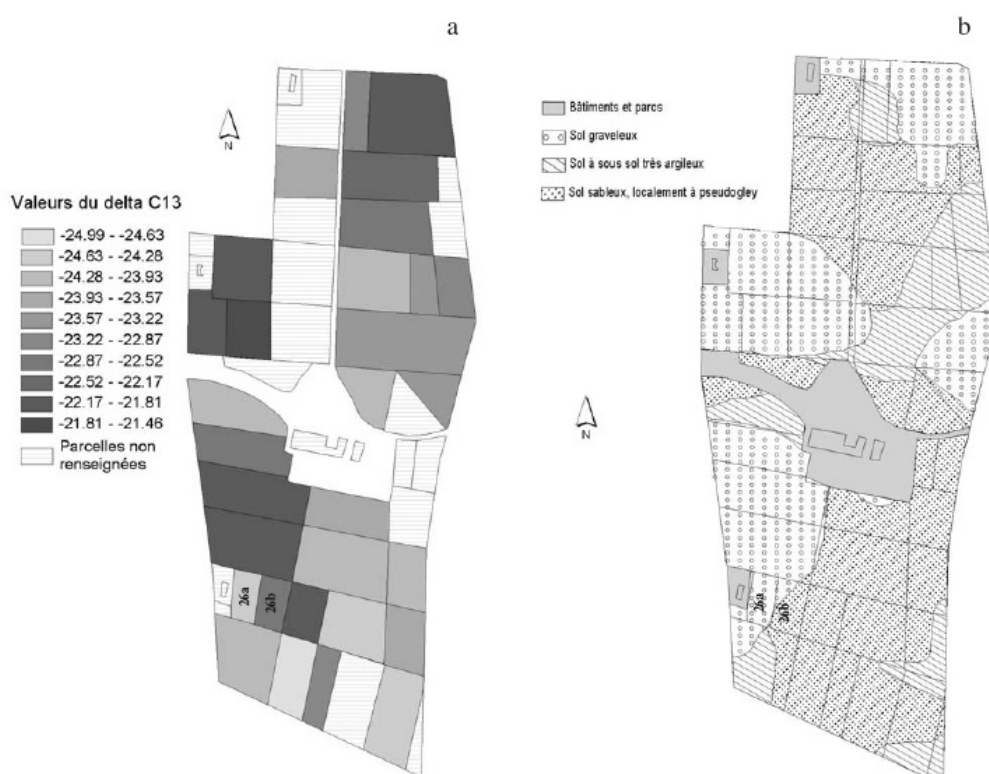


Figure 2. Comparaison entre le $\delta^{13}\text{C}$ des sucres du moût mesuré en 2000 sur un grand nombre de parcelles d'une propriété (a), et la carte des textures des sols de la même propriété (d'après Van Leeuwen *et al*, 2001b).

Incidence du régime hydrique de la vigne sur son développement et sur la constitution du raisin à maturité

L'apparition d'une contrainte hydrique au cours de la saison modifie profondément le fonctionnement physiologique de la vigne. Elle peut s'installer plus ou moins rapidement, suivant l'année. Un déficit hydrique provoque la fermeture des stomates pendant une partie de la journée. La régulation stomatique limite la photosynthèse et sera d'autant plus intense que le déficit hydrique est sévère. La réduction de l'alimentation en eau favorise l'arrêt de croissance des rameaux de la vigne ; elle limite aussi le grossissement des baies, notamment lorsqu'elle intervient avant la véraison (Becker et Zimmermann, 1984). Lorsque les racines se trouvent dans un sol en cours d'assèchement, leurs

extrémités produisent de l'acide abscissique. Cette hormone est favorable à la maturation du raisin. Une limitation de l'alimentation en eau de la vigne induit des effets négatifs sur la maturation du raisin (limitation de la photosynthèse) et des effets positifs (production de l'acide abscissique, limitation de la compétition pour les substances carbonées par les apex en croissance, baies moins volumineuses). En cas de déficit hydrique modéré, les effets positifs l'emportent sur les effets négatifs : les raisins sont plus riches en sucres réducteurs, en anthocyanes et en tanins et moins riches en acide malique (Van Leeuwen et Seguin, 1994, Trégoat *et al.*, 2002). En cas de stress hydrique sévère, la photosynthèse se trouve trop fortement limitée et des blocages de la maturation peuvent se produire.

En viticulture, il est fondamental de savoir jusqu'où va le déficit hydrique, favorable à la qualité, et à partir de quel seuil commence le stress hydrique, défavorable à la qualité. La réponse à cette question dépend du type de production, du type de substance considérée et du niveau de rendement.

La plupart des études qui relient l'état hydrique de la vigne à la constitution du raisin concernent la production de vins rouges. Il est généralement admis que la plage de contrainte hydrique favorable à la qualité est plus grande pour les raisins noirs que pour les raisins blancs. Sur une exploitation qui produit à la fois du vin rouge et du vin blanc, il est, dans ces conditions, logique d'implanter les cépages rouges sur les sols avec les plus faibles réserves hydriques.

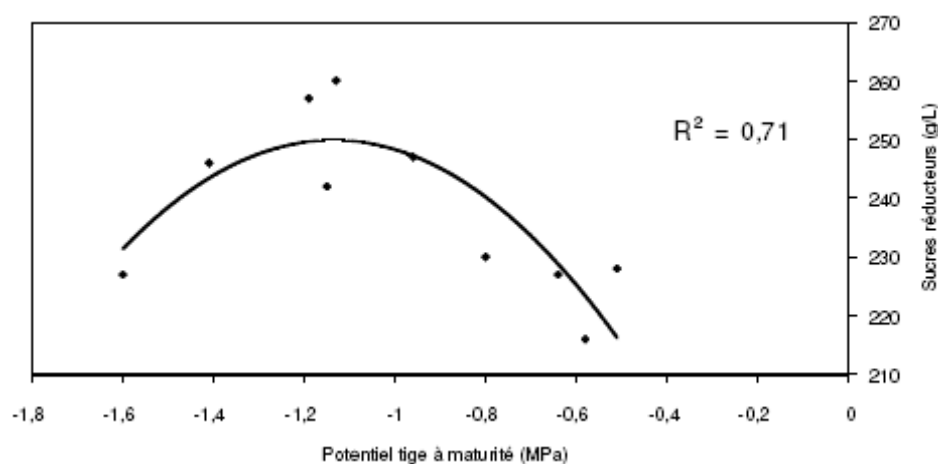


Figure 3. Corrélation entre l'intensité de la contrainte hydrique (évaluée par la mesure du potentiel tige à maturité) et la concentration en sucres réducteurs.

Parmi les substances favorables à la qualité des vins rouges, l'accumulation des sucres est maximale pour une alimentation en eau modérément limitante. Aussi bien en cas d'un régime hydrique moins contraignant qu'en cas de stress plus sévère, la teneur en sucre du raisin est plus faible (figure 3). Sur la même gamme de contrainte hydrique, la richesse en anthocyanes augmente de façon linéaire ; elle est la plus élevée sur la parcelle avec le régime hydrique le plus limitant (figure 4). La qualité d'un vin rouge dépend davantage de sa teneur en composés phénoliques que de la teneur en sucres du raisin à maturité. Le potentiel œnologique des raisins noirs peut donc être excellent, même si une forte contrainte hydrique pénalise légèrement la richesse en sucres du moût.

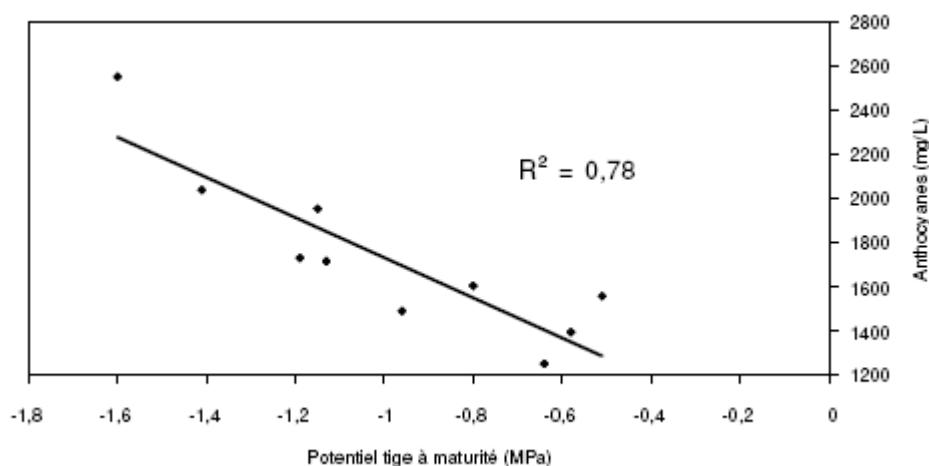


Figure 4. Corrélation entre l'intensité de la contrainte hydrique (évaluée par la mesure du potentiel tige à maturité) et la concentration en anthocyanes.

La question de l'effet de la contrainte hydrique sur la qualité ne doit pas être séparée du niveau de rendement. Il est observé par les praticiens que des vignes éclaircies (limitation du rendement par réduction du nombre de grappes) sont beaucoup moins sensibles aux contraintes hydriques sévères que des vignes supportant une forte charge en raisins.

Effet de la contrainte hydrique sur la précocité de la maturité

Le moment où les raisins arrivent à maturité dépend à la fois de la précocité du cycle phénologique, qui peut être évaluée par la date de mi-véraison, et de la vitesse de maturation, qui peut être calculée d'après Duteau (1990). La précocité du cycle phénologique dépend essentiellement de la température du sol, qui est en relation avec sa teneur en eau (Morlat, 1989). La vitesse de maturation est en grande partie déterminée par le régime hydrique de la vigne (Van Leeuwen et Seguin, 1994). Un déficit hydrique est favorable à une maturation rapide, car il limite la taille des baies (et donc du compartiment à remplir avec des sucres) et il réduit la compétition pour les substances carbonées entre les baies et les apex. La figure 5 montre un exemple de l'incidence du régime hydrique sur la vitesse de maturation et la précocité de trois parcelles avec des sols très différents (Van Leeuwen et Rabusseau, résultats non publiés). Pour faire abstraction de l'influence de la température sur la vitesse de maturation, les dates sont indiquées en abscisse par la somme des températures actives à partir du premier août, calculée avec un seuil à 10°C. La vigne a subi une contrainte hydrique sur le sol graveleux et le planosol ; l'évolution de la maturité de la pulpe (rapport sucres sur acidité) est rapide dans ces parcelles. Sur le luvisol, l'alimentation en eau de la vigne a été non limitante ; la maturation de la pulpe est lente. Malgré des dates de mi-véraison très proches sur ces parcelles (le 10 août sur le sol graveleux, le 11 août sur le planosol et le luvisol), l'écart de précocité atteint 70°C.jours en somme de températures actives, soit environ 7 jours après quatre semaines de maturation.

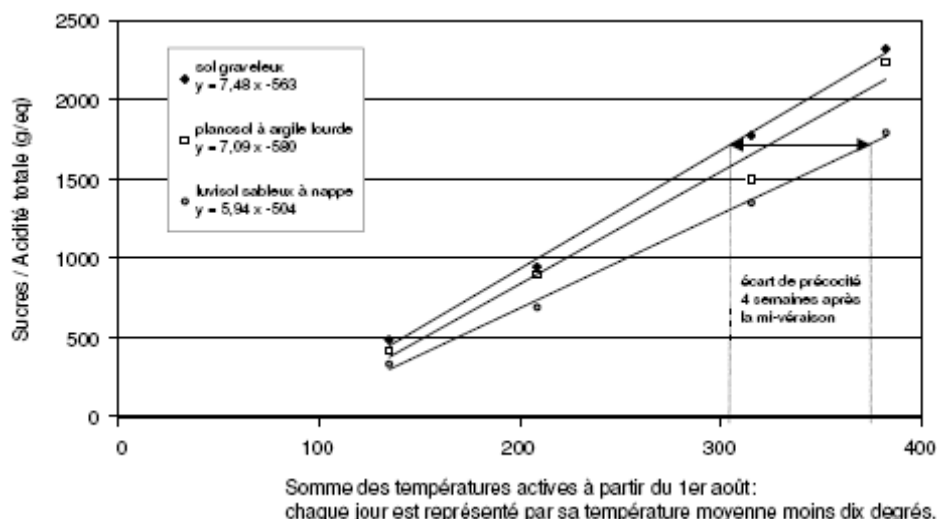


Figure 5. Vitesses de maturation sur trois sols de la région de Saint-Emilion (Merlot noir en 2001). Les vitesses de maturation sont calculées d'après Duteau (1990), modifié par Van Leeuwen et Rabusseau. La vitesse de maturation correspond à la pente de la droite (soit a de l'équation $y = ax + b$).

Dans la grande majorité des cas, les sols humides sont à la fois des sols froids et des sols qui fournissent une alimentation en eau non limitante. Les raisins arrivent à maturité tardivement sur ces sols, car le cycle phénologique y est retardé et la maturation y est lente. Suivant le même raisonnement, la plupart des sols secs sont des sols précoces. Il existe dans certains crus très réputés du Bordelais, notamment à Pomerol, mais aussi plus localement à Saint-Emilion et dans le Haut-Médoc, des sols très argileux. Ils ont la particularité d'être riches en eau (et donc froids), mais de provoquer néanmoins des contraintes hydriques précoces. En raison de la nature des argiles (smectites) la disponibilité de l'eau (malgré son abondance) y est très faible. Ces sols sont précoces et même si on y a implanté, pour des raisons historiques, du Merlot à Pomerol, le Cabernet-Sauvignon arrive parfaitement à maturité sur le même type de sol dans le Haut-Médoc. Cet exemple montre que la contrainte hydrique joue un rôle essentiel sur la précocité de la vigne et que son effet est plus important que celui de la température du sol. Le choix du cépage par rapport au type de sol dépend en grande partie de la précocité de la parcelle. Il est donc en étroite relation avec le régime hydrique (Van Leeuwen, 2001).

Régime hydrique et effet millésime

Le régime hydrique d'un millésime peut être évalué par le calcul du bilan hydrique. Les valeurs proposées dans la figure 6 indiquent donc pour quelques millésimes du Bordelais un indice de contrainte hydrique théorique calculé d'après Riou et Lebon (2000). Les millésimes de faible qualité possèdent sans exception un indice de contrainte hydrique proche de 1 à la fin du mois de septembre (ce qui correspond approximativement au moment des vendanges). Les millésimes où la vigne a subi une forte contrainte hydrique correspondent sans exception à de grands millésimes. Globalement à l'échelle de l'ensemble du Bordelais, il n'y a aucun millésime dont la qualité a été dépréciée par stress hydrique excessif. Cependant, ponctuellement sur certaines parcelles (notamment des jeunes vignes à système racinaire encore superficiel, fortement chargées en raisins, en sol de graves), des blocages de maturation peuvent se produire au cours d'un été très sec avec des conséquences négatives sur la qualité des vins.

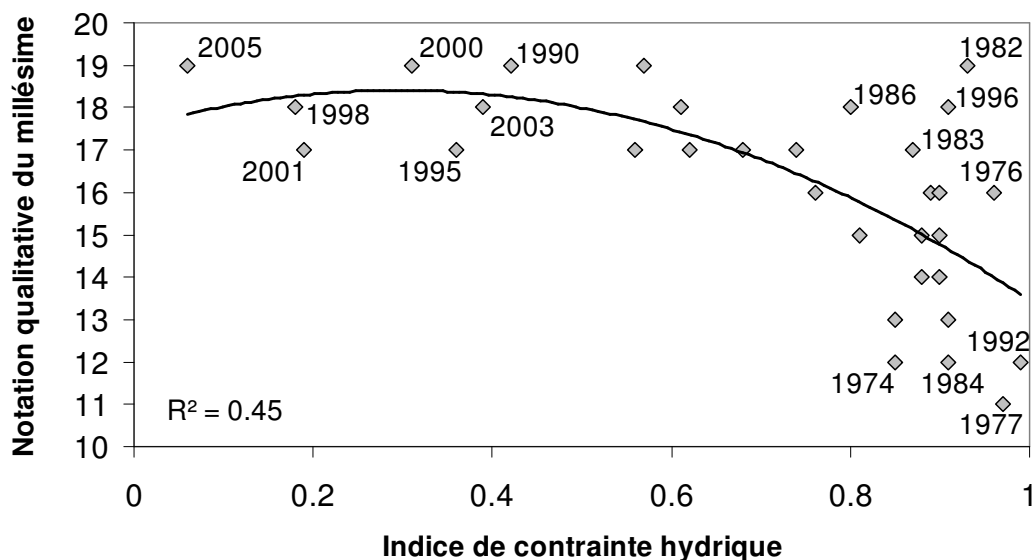


Figure 6. Relation entre la qualité du millésime (notes /20) dans le bordelais et le niveau de contrainte hydrique subie par la vigne calculé sur la période véraison – récolte à l'aide d'un modèle de bilan hydrique. Plus la valeur de l'indice est proche de zéro, plus le millésime est sec (d'après Bois *et al.*, non publiés).

Les possibilités de modifier le régime hydrique de la vigne

Le régime hydrique idéal pour la production de raisin à fort potentiel œnologique correspond à une situation de contrainte hydrique modérée, qui intervient tôt dans la saison (avant la véraison). À l'inverse, le potentiel œnologique du raisin sera moindre, aussi bien en l'absence de contrainte hydrique, qu'en cas de stress hydrique excessif.

La perte de qualité par un déficit hydrique insuffisant est beaucoup plus fréquente que la perte de qualité par un stress hydrique excessif, même si elle passe généralement inaperçue. Lorsque la pluviosité estivale et la réserve en eau des sols ne permettent pas d'atteindre de façon régulière un déficit hydrique suffisant, il faut augmenter la surface foliaire par hectare pour augmenter l'évapotranspiration réelle et choisir un porte-greffe qui valorise peu les réserves en eau du sol (Riparia Gloire de Montpellier par exemple). Ces situations peuvent également être valorisées par le choix de l'encépagement (cépages blancs ou cépages rouges précoces (Van Leeuwen, 2001)).

Dans les situations où il se produit certaines années une perte de qualité par stress hydrique excessif (climat très sec, sols avec de faibles réserves en eau), il est possible de limiter les effets négatifs sur la vigne par une adaptation de la conduite de la vigne et du matériel végétal (Choné *et al.*, 2001b). La meilleure protection contre les effets néfastes d'un stress hydrique est une limitation du rendement. Un rendement modéré permet d'avoir une surface foliaire moyennement faible sans altérer le rapport feuille/fruit. Le choix de porte-greffes résistants à la sécheresse (par exemple le 110 Richter) est sûrement la forme d'adaptation à la sécheresse la plus répandue. On peut également signaler qu'une faible alimentation en azote de la vigne réduit ses besoins en eau, par une limitation de la vigueur et de la surface foliaire.

Dans des situations extrêmes, et lorsque la législation le permet, le viticulteur peut avoir recours à l'irrigation. On considère que la culture de la vigne avec des rendements économiquement viables est difficile lorsque la pluviosité annuelle est inférieure à 400 mm. Cette valeur doit cependant être modulée en fonction de la répartition des précipitations au cours de l'année et de la capacité de rétention d'eau

des sols. Sous des climats très secs, l'irrigation raisonnée peut être un facteur de qualité, mais une irrigation mal conduite peut également provoquer une perte de potentiel œnologique du raisin. Lorsqu'elle est nécessaire, l'irrigation doit amener la vigne progressivement à une situation de contrainte hydrique modérée, tout en lui évitant de basculer dans une situation de stress hydrique. Ce pilotage fin de l'irrigation peut être réalisé grâce au suivi régulier de l'état hydrique de la vigne par la mesure du potentiel tige (Choné *et al.*, 2001b).

Le concept de la culture de la vigne sous contrainte environnementale a pendant longtemps été l'apanage des vignobles européens, et notamment les vignobles d'A.O.C. Il est intéressant de constater que cette notion commence à faire son chemin dans les vignobles du Nouveau Monde. Les Australiens expérimentent avec succès deux concepts d'irrigation, où l'alimentation en eau de la vigne est volontairement réduite. Dans le cas du « Regulated Deficit Irrigation » (R.D.I.), une contrainte hydrique est volontairement provoquée après la floraison par une période sans irrigation, notamment pour réduire la taille des baies (Dry *et al.*, 2001). Le « Partial Rootzone Drying » (P.R.D.) fait appel à une irrigation alternée. Avec une périodicité d'environ deux semaines, chaque côté du rang est irrigué de façon alternée. Ainsi, une partie du système racinaire se trouve en permanence dans un sol qui est en train de s'assécher. Un effet très net est constaté sur le potentiel œnologique du raisin, qui peut en partie être expliqué par une plus grande synthèse d'acide abscissique en comparaison avec des vignes irriguées et ne subissant aucune contrainte hydrique (Stoll *et al.*, 2001).

Références bibliographiques

- Becker N., Zimmermann A., 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. Bulletin O.I.V. 641-642, 584-596.
- Choné X., Van Leeuwen C., Dubourdiou D., Gaudillère J.P., 2001a. Stem water potential is a sensitive indicator for grapevine water status. *Annals of Botany* 87, 477-483.
- Choné X., Tregoat O., Van Leeuwen C., 2001b. Fonctionnement hydrique des terroirs, base de l'irrigation raisonnée de la vigne. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, N° Hors série : « Un raisin de qualité : de la vigne à la cuve », 47-51.
- Duteau J., 1990. Relations entre l'état de maturité des raisins (Merlot noir) et un indice climatique. Utilisation pour fixer la date des vendanges en année faiblement humide dans les crus de Bordelais. *In Actualités œnologiques* 89, pp. 7-12, Dunod (Ed.) Paris.
- Dry P., Loveys B., McCarthy M., Stoll M., 2001. Strategic irrigation management in Australian vineyards. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 35, 129-139.
- Gaudillère J.P., Van Leeuwen C., Ollat N., 2002. Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *Journal of Experimental Botany* 53, 757-763.
- Lebon E., Dumas V., Pieri P., Schultz H.R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology* 30, 699-710.
- Morlat R., 1989. Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Application aux vignobles rouges de la moyenne vallée de la Loire. Thèse de Doctorat d'Etat, 289 p. + annexes, Université Bordeaux II.
- Riou C., Lebon E., 2000. Application d'un modèle de bilan hydrique et de la mesure de la température de couvert au diagnostic du stress hydrique de la vigne à la parcelle. *Bulletin de l'O.I.V.* 73, 755-764
- Seguin G., 1970. Les sols de vignobles du Haut-Médoc. Influence sur l'alimentation en eau de la vigne et sur la maturation du raisin. Thèse de Doctorat d'Etat, 141 p., Faculté des Sciences, Université de Bordeaux.
- Stoll M., Loveys B., Dry P., 2000. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany* 51, 1627-1634.

Tregoat O., Van Leeuwen C., Choné X., Gaudillère J.P., 2002. Etude du régime hydrique et de la nutrition azotée de la vigne par des indicateurs physiologiques. Influence sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 36, 133-142.

Valancogne C., Nasr Z., 1989 Measuring sap flow in the stem of small trees by a heat balance method. *HortScience* 24, 383-385.

Van Leeuwen C., 2001. Choix du cépage en fonction du terroir dans le Bordelais. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, N° Hors série : « Un raisin de qualité : de la vigne à la cuve », 97-102.

Van Leeuwen C., 2003. Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. *Bulletin de l'O.I.V.* 76, 367-378.

Van Leeuwen C., Choné X., Tregoat O., Gaudillère J.P., 2001a. The use of physiological indicators to assess vine water uptake and to manage vineyard irrigation. *The Australian Grapegrower and Winemaker* 449, 18-24.

Van Leeuwen C., Gaudillère J.P., Tregoat O., 2001b. Evaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 35, 195-205.

Van Leeuwen C., Lerich O., Renard R., Tregoat O., Alla P.L., 2000. Micromorphometric changes in trunk diameter in relation to mild water stress in field grown vines. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 34, 41-47.

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). *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 28, 81-110.