

## **Stress hydrique prolongé des vignes : comment adapter les pratiques œnologiques en conséquence ?**

**Escudier J.L., Bes M., Salmon J.M., Caillé S., Samson A.**

INRA, UE 999, Domaine de Pech Rouge, F-11430 Gruissan

Correspondance : [escudier@supagro.inra.fr](mailto:escudier@supagro.inra.fr)

### **Résumé**

Dans un contexte de changement climatique, d'exigences environnementales, à l'instar de la viticulture de précision, une œnologie dite « de précision » se met en place pour des vendanges en situation de stress hydrique prolongé. La qualité de ces vins n'est pas classiquement optimale et c'est tout le travail de l'œnologue que de retrouver les équilibres physico-chimiques et sensoriels perdus. Cette œnologie d'intervention se décline sur la vendange tout au long de la succession des opérations unitaires de la vinification en lien avec la maîtrise des phénomènes d'oxydation. Sur vin, il s'agit de maîtriser les extractions en cours de vinification, la stabilité et leur équilibre organoleptique jusqu'au conditionnement. Les interventions de l'œnologue se font en lien en particulier avec la teneur des vins en alcool et leur équilibre au niveau acidité et pH. Pour cela, les technologies membranaires de par leur pilotage par des capteurs en ligne et leur spécificité permettent de répondre à ces défis scientifiques et technologiques. Il s'agit d'innovations récentes, permises maintenant par la réglementation et déjà disponibles sur le terrain en traitement de prestation de service.

**Mots clés :** stress hydrique, vigne, stratégie d'adaptation, œnologie.

### **Abstract: Adaptation of enological practices towards long term hydric stress of vineyards**

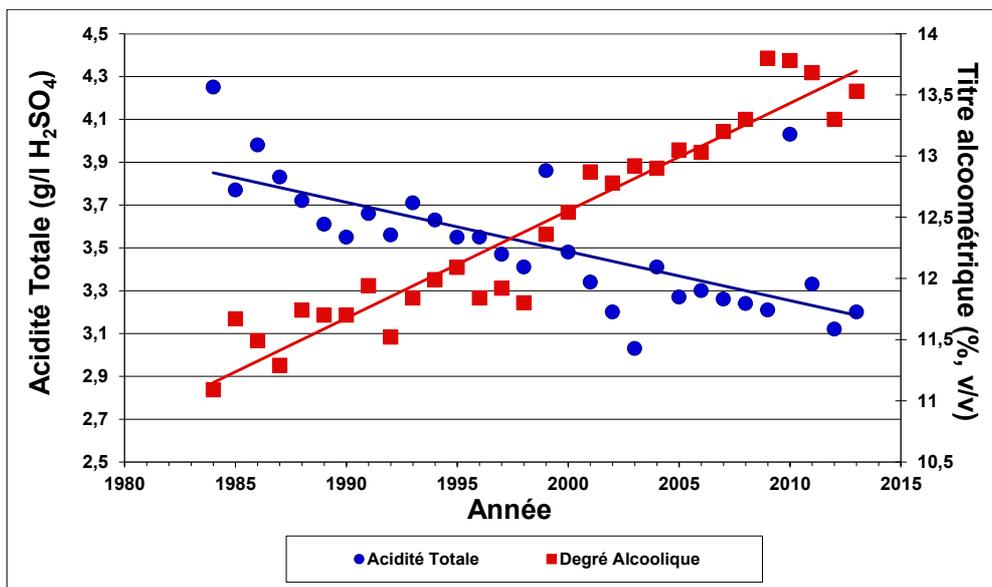
In the general context of climate change and environmental requirements, similarly to precision viticulture, a new type of enology, called "precision enology", was set up for the treatment of harvests of vines experiencing prolonged water stress. The quality of the corresponding wines is not conventionally optimal, and it is then all the work of the winemaker to correct the physico-chemical and sensory balances of these wines. This intervention of the winemaker comes from the harvest throughout the succession of operations of the winemaking in connection with the control of oxidation phenomena. On the final wine, the winemaker should precisely control extractions, stability and organoleptic balance up to the packaging. The potential interventions are linked in particular with the alcohol content of wine and the global acidity and pH balances. For this, membrane technologies by their potential control by on-line sensors and their specificity provide answers to these scientific and technological challenges. Such recent innovations now permitted by regulation are already available as true service deliveries.

**Keywords:** hydric stress, vines, strategy, adaptation, enology

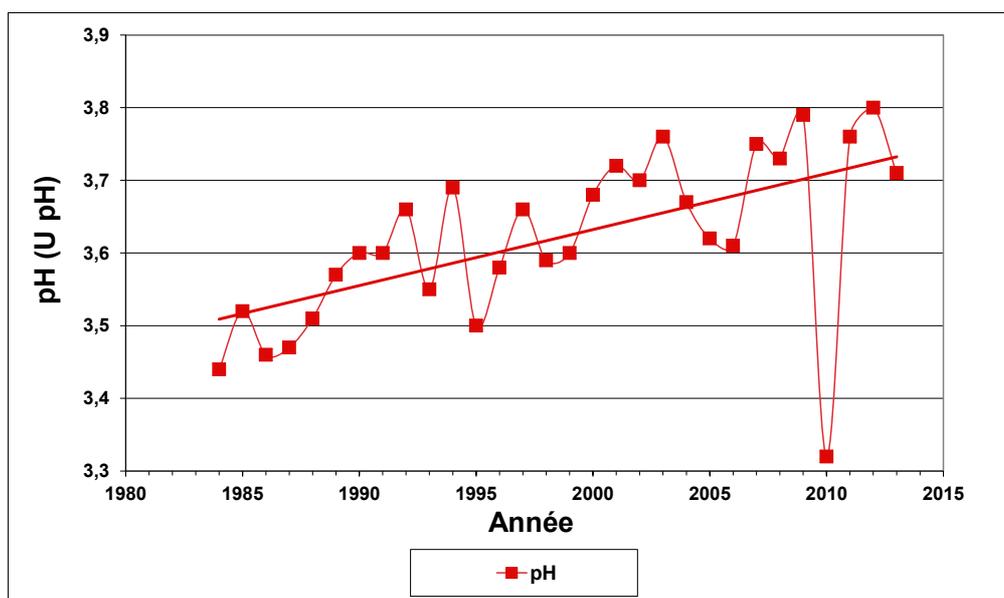
### **Introduction**

Depuis une vingtaine d'années, les effets de l'évolution climatique se font sentir dans certains bassins viticoles, méditerranéens par exemple, par une évolution significative de la composition analytique des vins. A titre d'exemple, les Figures 1 et 2 renseignent sur la moyenne des analyses annuelles d'un millier de vins du bassin de production narbonnais réalisée par le laboratoire Dubernet depuis 30 ans.

Ces données montrent de façon significative, voire spectaculaire, l'évolution de la composition des vins en terme de teneur en éthanol, de pH, et d'acidité.



**Figure 1 :** Evolution de l'acidité totale et du titre alcoolique des vins du Languedoc-Roussillon sur la période 1984-2013. Source : Laboratoire Dubernet Œnologie (Narbonne, France).



**Figure 2 :** Evolution du pH des vins du Languedoc-Roussillon sur la période 1984-2013. Source : Laboratoire Dubernet Œnologie (Narbonne, France).

Sur la même période 1980-2013 les relevés de la station météorologique de Pech-Rouge quantifient sur la période végétative (avril-septembre) un bilan hydrique déficitaire de façon continue depuis l'année 2000 jusque l'année 2013. Sur ces 14 années successives l'évapotranspiration est significativement supérieure aux précipitations. Ceci met l'essentiel de ce vignoble de ce bassin de production chaque été en situation de stress hydrique, en dehors des 15% à 20% de vignes actuellement irriguées. L'analyse des caractéristiques des vins issus de vignes en situation de stress hydrique prolongé s'inscrit dans cette tendance globale d'évolution de leur composition en l'aggravant mais faiblement le

plus souvent sur le critère baisse d'acidité, augmentation du pH et parfois en la corrigeant légèrement à la baisse sur le critère teneur en alcool lorsqu'il y a blocage de maturation.

Le stress hydrique ne se limite pas par ses conséquences à produire des vins avec des acidités trop basses ou des teneurs en alcool devenues excessives. La composition en polyphénols du raisin et des vins est également modifiée par un stress hydrique prolongé. Les études en cours et les observations des professionnels montrent que souvent la qualité des vins est influencée négativement notamment au niveau de la finesse du bouquet et de l'amertume des vins blancs, l'astringence des vins rouges (Barbeau *et al.*, 2008). La récolte du raisin réalisée plus précocement, au mois d'août fréquemment, avec des températures nocturnes comme diurnes élevées complexifie le travail de l'œnologue qui doit adapter ses pratiques œnologiques.

Dans ce contexte, ne rien faire en termes d'œnologie conduirait à élaborer des vins alcoolisés, moins acides, avec des conséquences parfois négatives en termes de stabilité, de maîtrise de la qualité et d'adaptabilité au marché. En fait, rester inactif face à ces évolutions revient à subir un changement inéluctable de la qualité des produits, souvent à la baisse. L'impact économique est d'autant plus négatif que le stress hydrique des vignes associe aussi à cette perte de qualité, une perte de poids de vendange.

Les premiers champs d'action de l'œnologue sur les vins vont donc concerner la réduction partielle du degré d'alcool des vins, d'une part, la correction de l'acidité des vins, d'autre part. Sur ces deux sujets, des travaux expérimentaux initiés et menés par les équipes de l'INRA et leurs partenaires, publics et privés, ont permis de proposer au fil des années un ensemble d'outils technologiques, pouvant être qualifiés maintenant d'innovants car transférés significativement vers les professionnels de la filière, et ce dans l'ensemble des régions viticoles mondiales.

## **1. Caractérisation des raisins et vins issus de vignes en situation de stress hydrique en méthode de vinification classique.**

S'il est communément admis que la vigne en sol profond d'alluvions avec une réserve en eau importante conduit à des rendements élevés qui ne génèrent pas des vins de qualité, il n'est pas pour autant vrai que la vigne en sol pauvre et en situation de stress hydrique produira des vins de qualité. En effet, on a trop souvent tendance à penser qu'il faille que la vigne souffre d'un manque d'eau pour produire des grands vins. Les progrès faits ces dernières années dans l'analyse de l'état hydrique de la plante à un instant « t » associés aux connaissances sur la physiologie de la vigne ont permis de mieux cerner les besoins en eau et surtout la période optimale où ces besoins doivent être satisfaits. C'est pourquoi, il est possible aujourd'hui d'établir un programme raisonné d'irrigation de la vigne sans que cela soit considéré comme une hérésie.

L'évolution des mentalités et de la législation sur les autorisations d'irrigation où autrefois elle était proscrite est concomitante avec l'incidence du réchauffement climatique. Celui-ci, dans certaines zones méridionales a conduit à une détérioration de l'état physiologique de la vigne et à une chute de rendements impactant le revenu des viticulteurs.

Le vignoble de l'INRA à l'Unité Expérimentale de Pech-Rouge est une très bonne illustration de cette évolution. C'est pourquoi l'étude de la contrainte hydrique sur la vigne est un programme de recherche majeur au sein de l'unité de Pech-Rouge. Pour illustrer l'impact positif qu'une irrigation raisonnée peut avoir sur les raisins et la qualité des vins qu'elle produit, nous proposons un résumé d'une étude menée en 2012 à Pech-Rouge sur ce continuum vigne - raisin - vin en prenant en compte l'apport d'eau.

### 1.1 Matériel végétal et dispositif expérimental

La parcelle étudiée est une parcelle de Syrah (clone 99/R 140, plantée en 2001), conduite en espalier haute avec une distance de plantation 2,50 m \* 1m et des rangs orientés nord-ouest, sud-est. Cette parcelle est située en terroir sec sur les coteaux exposés au sud-est de la colline de La Clape et en sol argilo-calcaire sur calcaire dur fissuré.

**Tableau 1** : Caractéristiques du traitement appliqué aux ilots de vigne

Traitement	Caractéristiques	Ilot
Non Irrigué	Avec les niveaux de contrainte hydrique naturelle en fonction des caractéristiques du millésime	NI <sub>1</sub>
Non Irrigué		NI <sub>2</sub>
Non Irrigué		NI <sub>3</sub>
Irrigué	L'irrigation sera déclenchée pour maintenir les souches à des niveaux de contrainte hydrique faibles ou nuls (potentiels hydriques foliaires de base entre 0 et -0,3 MPa)	I <sub>1</sub>
Irrigué		I <sub>2</sub>

Le suivi de l'état hydrique des ceps a été fait par une mesure du potentiel hydrique foliaire de base selon une fréquence hebdomadaire, avec un échantillon de 3 feuilles par placette (4 placettes par ilot), soit par répétition 12 feuilles par traitement et par mesure.

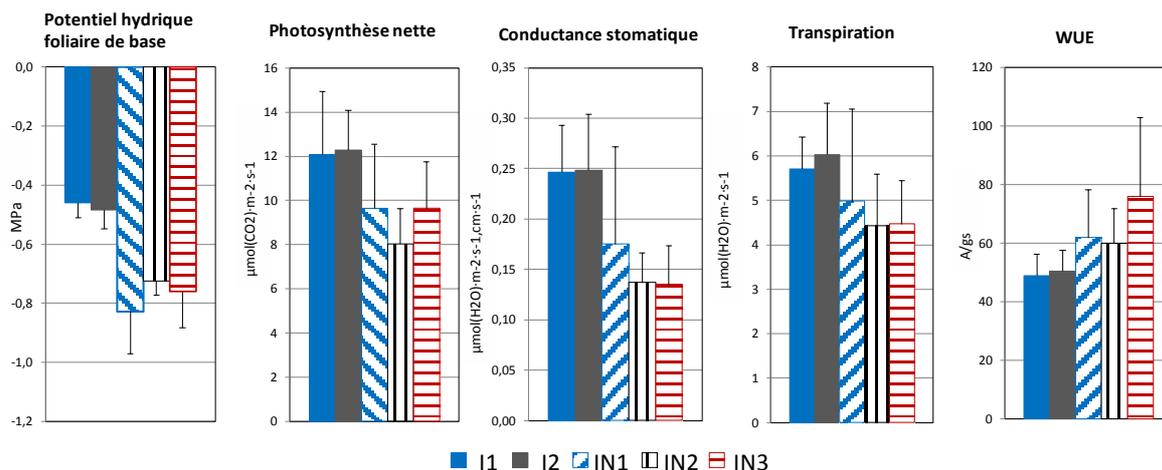
La caractérisation de l'état physiologique des plants (photosynthèse, transpiration, conductance stomatique) a été effectuée 5 jours avant la récolte sur une analyse de 3 plantes par répétition.

### 1.2 Résultats

Le suivi de l'état hydrique, réalisé avec des mesures hebdomadaires de potentiel hydrique foliaire de base ( $\Psi_b$ ) à l'aide d'une chambre à pression, a montré une claire différence entre le traitement irrigué (I) et le traitement non irrigué (NI). Cette différence a été significative pratiquement pendant toute la période comprise entre fin juillet et la récolte, avec une interruption de quelques jours en raison des fortes pluies de début septembre (total des irrigations = 73,1 mm). Pendant cette période, les traitements sans irrigation ont supporté des contraintes hydriques très fortes à sévères.

L'irrigation, pour contrôler l'état hydrique des souches dans le traitement (I), a été réalisée par un système goutte à goutte. Un total de 111,6 mm d'irrigation a été appliqué en 18 fois pendant la saison et les valeurs de potentiels ont été maintenues autour de -0,4 MPa (niveau de contrainte hydrique de faible à moyenne intensité).

Le fonctionnement physiologique des ceps a été étroitement lié au niveau de contrainte hydrique. En effet, les valeurs de photosynthèse nette, transpiration et conductance stomatique ont été significativement réduites dans les traitements non irrigués comme l'indique les données de la Figure 3. Cependant, l'efficacité intrinsèque d'utilisation de l'eau (WUE), calculée par le rapport entre les valeurs de photosynthèse nette et de conductance stomatique, a augmenté avec l'intensité de la contrainte hydrique. Cette détermination a été réalisée tardivement dans la saison lorsque les différences de potentiels hydriques entre les traitements irrigués et non irrigués n'étaient pas maximales.



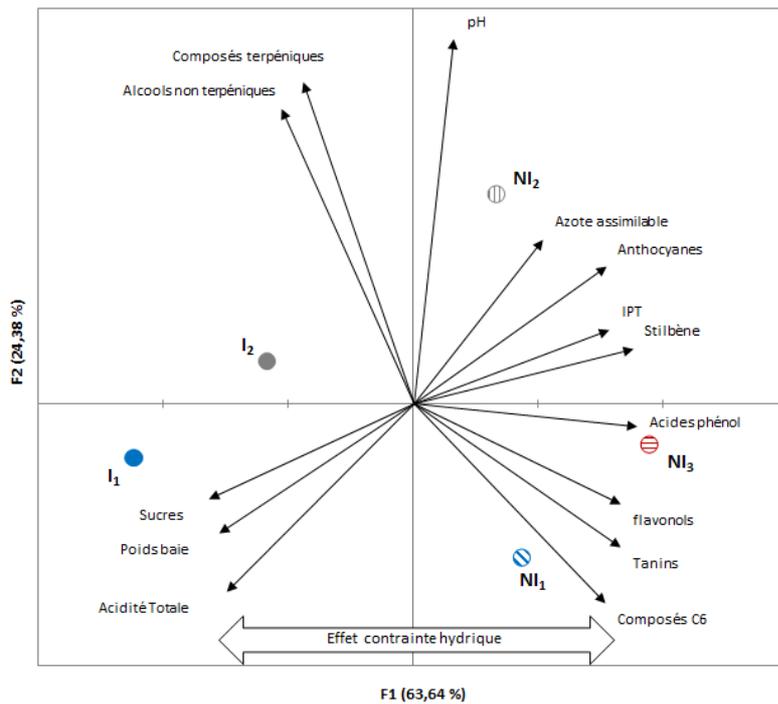
**Figure 3 :** Valeurs de potentiels hydriques foliaires de base (en MPa) : photosynthèse nette maximale, conductance stomatique maximale, transpiration et efficacité intrinsèque de l'eau (WUE).

La caractérisation physico-chimique des raisins à la récolte (Tableau 2) montre que, dans les raisins issus des plantes irriguées (I), les baies sont plus lourdes et les moûts sont plus riches en sucres et en acidité totale et moins riches en anthocyanes et en IPT par rapport aux plantes non irriguées (NI). Ces différences semblent plus importantes dans les conditions de contraintes hydriques les plus fortes.

**Tableau 2 :** Valeurs correspondant à la caractérisation physico-chimique des raisins à la récolte. Pour chaque paramètre, les lettres indiquent des groupes homogènes formés par le test LSD Fisher ( $P \leq 0,05$ ).

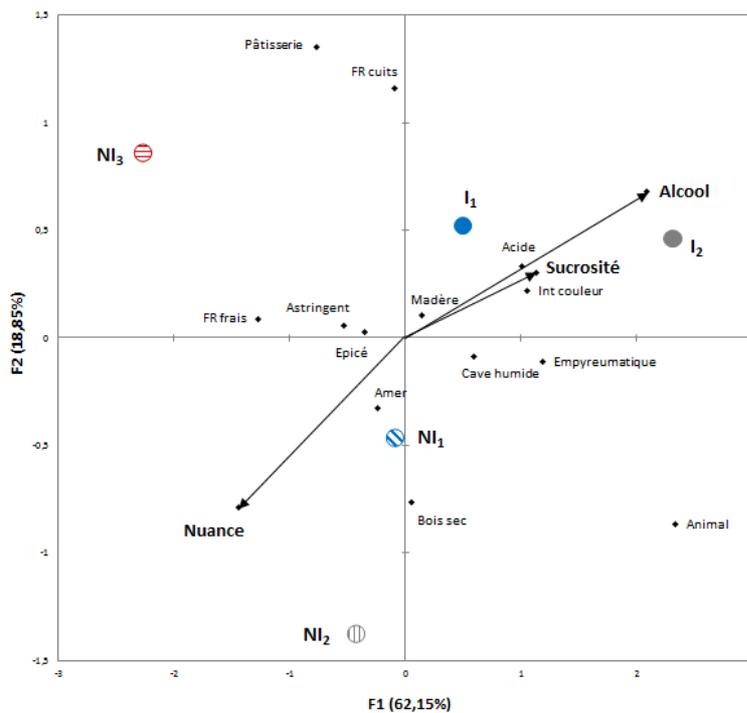
Paramètre	Traitements				
	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	NI <sub>1</sub>	NI <sub>2</sub>	NI <sub>3</sub>
Poids d'une baie (g)	1,68 b	1,38 b	1,35 a	1,27 a	1,28 a
pH	3,60 a	3,62 ab	3,56 a	3,68 b	3,63 ab
Acidité Totale (gH <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /L)	3,26 a	3,24 a	3,18 a	3,10 a	3,15 a
Degré Brix °B	22,7 c	22,6 c	22,3 bc	21,8 ab	21,4 a
Sucres (g/L)	222,9 c	221,8 c	217,7 bc	212,0 ab	207,4 a
DO 280 (IPT)	30,9 a	32,4 ab	35,9 c	36,2 c	34,7 bc
Anthocyanes (mg/L)	559,8 a	595,2 ab	632,5 bc	652,9 c	624,7 bc
Azote aminé (mgN/L)	117,1 a	124,7 a	112,0 a	146,9 ab	173,0 b
Azote ammoniacal (mgN/L)	37,2 a	39,3 a	28,0 a	38,9 a	41,5 a
Azote assimilable total (mgN/L)	154,3 a	164,0 ab	140,0 a	185,8 ab	214,5 b
Alcools non terpéniques (µg/Kg)	2025 b	2601 c	1259 a	2489 bc	1223 a
Composés terpéniques (µg/Kg)	174,7 b	204,3 bc	140,7 a	208,6 c	139,5 a
Composés groupe C6 (µg/Kg)	115,1 a	123,2 a	147,9 b	123,3 a	149,9 b

Les effets globaux des différents traitements sur les caractéristiques des raisins à la récolte sont bien visibles dans la Figure 4. L'irrigation produit une contrainte hydrique faible (I) et augmente significativement le poids des baies et les teneurs en sucres et acides par rapport aux traitements non irrigués (NI). Les raisins issus de ces derniers traitements sont plus riches en composés phénoliques, en azote assimilable et en composants glycosylés de type C6.



**Figure 4 :** Analyse en composantes principales avec les variables analytiques du raisin à maturité de récolte.

L'analyse sensorielle (Figure 5) confirme que le principal facteur de différenciation des vins reste l'état hydrique. Trois descripteurs permettent de différencier significativement les deux types de modalités : la nuance ( $p$ -value < 0,0001), la perception d'alcool ( $p$ -value = 0,003) et la perception de sucrosité ( $p$ -value = 0,101). Les vins des modalités irriguées sont de couleur plus rouge, et la perception gustative de l'alcool et de la sucrosité dans ces vins est plus importante. Les modalités non irriguées sont de couleur plus violette.



**Figure 5 :** Analyse en composantes principales des données de l'analyse descriptive des vins réalisée par un jury expert de 20 personnes.

### 1.3 Conclusion

En conclusion, dans les conditions de cet essai avec des répétitions, avec deux situations de contraintes hydriques bien contrastées, la différenciation est très explicite. La contrainte hydrique forte a favorisé la réduction de la taille des baies et des paramètres physiologiques tels que la photosynthèse, la conductance stomatique et la transpiration.

Cette réponse a été parallèle à une diminution des teneurs en sucres des moûts. L'analyse sensorielle pour les modalités vignes en situation de stress hydrique prolongé traduit un côté moins qualitatif pour des vins rouges, tant sur des critères visuels que gustatifs.

## 2. Du raisin au vin : quelles précautions et adaptations ?

De nombreux rapports scientifiques prospectifs ont montré que l'impact majeur du changement climatique attendu porterait sur la phénologie de la vigne. En raison de l'augmentation de la température, une avance de 20 à 40 jours pour n'importe quel stade de développement pourrait être prévu, avec un fort impact sur les sols et l'état hydrique de la plante, avec des impacts négatifs, principalement dans le Sud de la France (Ollat et Touzard, 2014). La maturation pourrait se produire dans des conditions beaucoup plus chaudes qu'aujourd'hui, ce qui aura une incidence sur la composition du raisin, mais aussi sur l'aptitude à élaborer les types actuels de vins (Goutouly, 2009). Toutefois, il n'existe qu'un très faible nombre de travaux scientifiques portant sur la réalité des effets induits par ce changement climatique sur la qualité des vins élaborés.

Les modifications attendues sur les vins mises en avant sont bien entendu une forte augmentation des degrés alcooliques (augmentation de la richesse en sucres des moûts) et une augmentation significative du pH (baisse de l'acidité des moûts), bien que l'effet induit du changement climatique sur la qualité des vins soit de fait pléiotropique. En effet, l'augmentation attendue du stress hydrique sur la vigne (voire des épisodes de sécheresse) va entraîner une limitation de la photosynthèse, menant à un arrêt de croissance végétative plus précoce, entraînant un plus faible poids de baies (diminution des rendements), de fait moins riches en acide malique, mais plus riches en polyphénols, le tout assorti d'un degré de maturation plus faible des pépins (Zamora, 2014). De telles modifications majeures des teneurs en constituants du raisin conduiront vraisemblablement à des problèmes d'efficacité des fermentations sur de tels moûts, assortis d'une perte probable d'efficacité des sulfites ajoutés du fait de l'augmentation attendue du pH de moûts. Le blocage anticipé de la maturation conduira vraisemblablement à une augmentation des teneurs en acides hydroxycinnamiques des moûts accompagnée par des teneurs plus faibles en glutathion (Schüttler *et al.*, 2013). Dans ces conditions, il est vraisemblable que l'on puisse constater des phénomènes d'oxydation plus prononcés des moûts (Frissant *et al.*, 2012) et une moins bonne conservation des vins (Pons *et al.*, 2014).

En ce qui concerne les dérives aromatiques possibles liées aux modifications d'environnement climatique de la vigne, il est à noter une étude intéressante montrant sur le cépage Merlot dans la région bordelaise une augmentation significative des teneurs en massoia lactone dont les attributs sensoriels sont reliés aux notes de figue et de noix de coco (Pons *et al.*, 2011). Dans le même ordre d'idée, il faut noter un travail déjà ancien montrant un effet significatif d'une exposition accrue au soleil sur l'apparition de teneurs élevées en 1,1,6-triméthylidihydronaphtalène (TDN) résultant de la dégradation chimique des caroténoïdes (Marais *et al.*, 1992). Ce composé aromatique est particulièrement important dans l'arôme des vins de Riesling car il influence les notes aromatiques florales et celles associées au vieillissement de ces vins (Schüttler *et al.*, 2013). Il apparaît donc clairement que les effets du changement climatique sur la qualité potentielle des vins peuvent être de natures très diverses, et différentes suivant les cépages concernés. Il convient donc d'envisager de nombreuses pistes différentes d'adaptation de la vinification de façon à donner à l'œnologue une véritable boîte à outils pour ses interventions.

## 2.1 Traitements de vinification possibles pour des raisins issus de vigne en stress hydrique

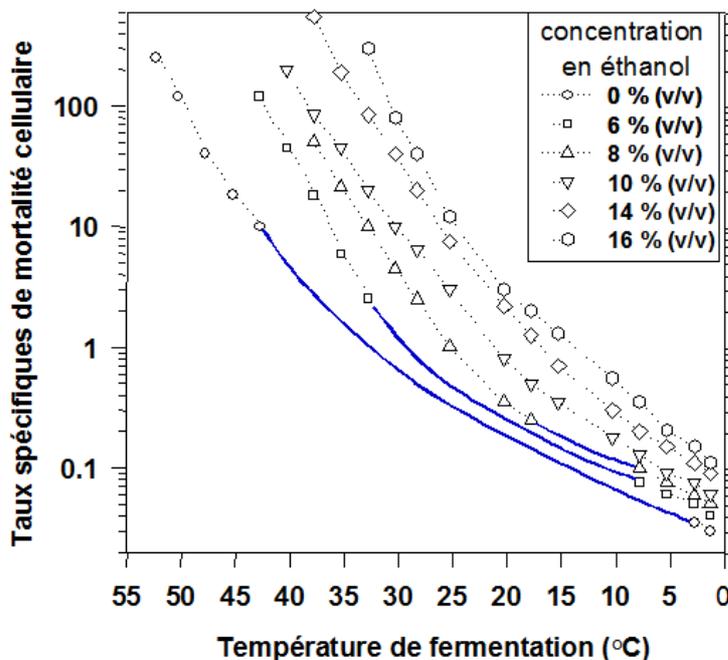
### 2.1.1 Extraction et vinifications : les grandes options en vinification en rouge

- **Métabolisme Anaérobie et durée de cuvaion.**

La fermentation intracellulaire à côté de la formation des composés aromatiques spécifiques crée les conditions d'une extraction graduelle des composés polyphénoliques. Bien que moins développée maintenant suite à la mécanisation des vendanges, vinifier en grappes entières non foulées est une option à conserver. Le couple temps/température a été étudié sur différents cépages (Flanzy, 1973). L'utilisation séparée de vin de goutte et de presse permet de gérer souplesse et fruité du vin, surtout au niveau du vin de presse. Des schémas faisant appel à des temps rallongés de cuvaion avec mise en place de remontages après la phase de métabolisme anaérobie ont aussi été expérimentés et proposés. Au niveau organoleptique, des différences significatives apparaissent entre vins jeunes (de quelques mois) selon le temps de cuvaion de 5 jours à 10 jours pour les applications les plus fréquentes. D'autre part, les vins de macération carbonique à plus basse température (20/25°C, plutôt que 30/32°C), dans les premiers mois de dégustation sont bien classés par les jurys de dégustation, rapidement les dégustateurs sélectionnent ensuite les vins ayant bénéficié de température de macération plus élevées (Flanzy *et al.*, 2001).

- **Températures de vinification**

Même si l'effet toxique de l'éthanol est progressif, son effet toxique sur le métabolisme cellulaire peut être décelé très précocement, notamment lors de températures de fermentation trop hautes, mais également trop basses (Figure 6). La plage de température où aucun effet toxique de l'éthanol n'est observable diminue de plus en plus jusqu'à ne plus être décelable à partir d'une concentration en éthanol d'environ 8% (v/v). Dans des conditions de fortes teneurs en sucres initiales, donc de fort degré d'alcool probable, il est donc déconseillé de fermenter à haute température (supérieure à 25°C) ou au contraire à trop basse température (inférieure à 15°C).



**Figure 6** : Diagramme de toxicité de l'éthanol en fonction de la température de fermentation. Les zones en bleu représentent les zones de température (pour une concentration en éthanol donnée) où aucun effet toxique de l'éthanol sur la viabilité cellulaire n'est observé (Sa-Correia et Van Uden, 1986).

- **Vinifications et durée de cuvaion**

Un équilibre d'extraction est obtenu assez rapidement après la fin de la fermentation alcoolique. L'extrait sec global du vin est légèrement accru par une cuvaion post fermentaire. L'intérêt de telles pratiques

en lien avec la gestion du couple temps-température en cours de vinification, bien maîtrisables en lien avec les remontages reste à évaluer par l'œnologue au niveau organoleptique en fonction de la qualité du raisin de chaque millésime. La bibliographie est riche pour chaque région viticole de travaux concernant les techniques de vinification. Il s'agit même du travail de base de l'œnologue qui suit au quotidien l'évolution de chacune des cuvées. Dans le cas de vendange à faible réserve de polyphénols, la macération finale à chaud est une des options de correction.

- **Prétraitement du raisin par flash détente sous vide**

Le chauffage de vendange permet de séparer dans le temps la phase d'extraction de celle de la fermentation. Le vin rouge est ainsi vinifié en phase liquide comme un vin blanc. Le couple temps/température de macération (de 60°C à 95°C, de quelques minutes à quelques heures), l'utilisation ou non du vide (flash détente) sont des leviers spécifiques de déstructuration des parois pelliculaires. Les extractions en cours de vinification se font plus rapidement qu'en vinification classique, dès le début de la vinification pour toutes les classes de composés polyphénoliques, anthocyanes, acides phénols mais aussi flavonols, proanthocyanidines et catéchines. Le rapport tannins sur anthocyanes est plus élevé pour les vins traités par flash détente que pour les vins vinifiés classiquement (Escudier *et al.*, 2008).

L'élimination des condensats générés par la mise sous vide du raisin permet si besoin, de limiter la teneur des moûts en composés en C6, et pyrazines par exemple, produits en quantité plus importante dans des raisins moins mûrs par une vigne en situation de stress hydrique prolongé.

L'analyse sensorielle permet en général de bien séparer pour chaque cépage étudié les vins prétraités par thermotraitement et par flash détente ou vinification classique au niveau de leurs perceptions aromatiques, plus élevées pour les références flash détente, plus fruités avec moins de notes animales et végétales.

Par ailleurs, les études en cours montrent l'impact de la clarification des moûts ainsi extraits par chauffage, sur la cinétique fermentaire et le profil sensoriel des vins produits, les niveaux de clarification les plus poussés orientant sur des profils vin primeur, pour ces vins de thermo traitement (Eudier *et al.*, 2011).

### **2.1.2 Tri des pépins**

La qualité des pépins peut impacter lors de vinification et macération sur marc la qualité des vins (Zamora, 2014). La présence de pépins verts insuffisamment mûrs peut contribuer à l'astringence de certains vins. Par contre, d'autres expérimentations ont montré qu'en doublant la quantité de pépins mûrs dans la vendange, ceci permet de doubler la teneur en catéchine et pro anthocyanidines des vins, procurant ainsi une meilleure structure (Kovac *et al.*, 1992).

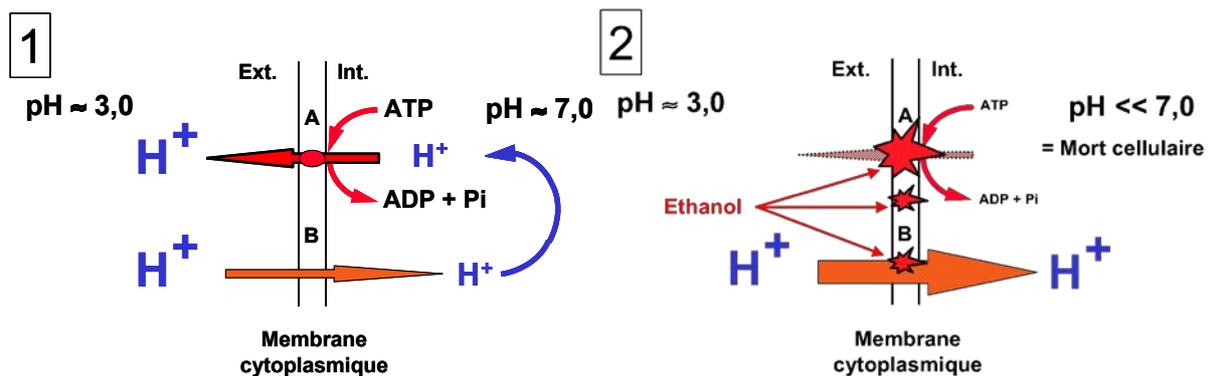
### **2.1.3 Utilisation de levure produisant moins d'alcool**

Le programme ANR VDQA (« Vins De Qualité à teneur réduite en Alcool ») a inclus une sélection de levures *Saccharomyces* avec un rendement de transformation sucre/alcool plus faible. En 2009, le gain en diminution d'alcool par rapport à une levure classique était de 0,1 à 0,2 % (vol). L'action de recherche s'est poursuivie entre la société Lallemand et l'Inra UMR SPO. Aux vendanges 2013, une nouvelle souche issue de ce programme a permis d'obtenir une baisse de 1,3 % (vol) avec une production augmentée de glycérol (jusque 17 g/L) (Tilloy *et al.*, 2014). Cette souche sera accessible dans un futur proche pour des évaluations plus complètes et diversifiées sur les sites de production.

### **2.1.4 Adjuvants d'aide à la fermentation alcoolique**

L'éthanol est une très petite molécule aux propriétés chimiques très similaires à celles de l'eau et donc susceptible de remplacer cette eau dans de nombreuses réactions enzymatiques du métabolisme. Cette molécule, par ses propriétés physico-chimiques, diffuse extrêmement facilement et librement

dans la membrane cytoplasmique, où elle vient remplacer des molécules d'eau et donc interférer avec les interactions existant entre protéines et phospholipides au sein de cette membrane. Son insertion en grande quantité dans la membrane cytoplasmique tend à rendre la membrane cytoplasmique plus perméable aux protons, mais également à diminuer l'efficacité, voire à supprimer l'activité de protéines de transport telle que l'activité ATPase-pompe à protons (Figure 7). La cellule pour compenser cette entrée croissante de protons doit donc dépenser plus d'énergie (sous forme d'ATP, molécule énergétique issue du métabolisme fermentaire des sucres) pour maintenir une bonne viabilité. Lorsque l'équilibre entre l'entrée passive des protons (favorisée par l'alcool) et l'excrétion active de protons (sous dépendance du métabolisme cellulaire) n'est plus maintenu, la cellule finit par mourir par acidification intracellulaire (Figure 7).



**Figure 7 :** Schémas simplifiés montrant l'effet délétère de l'éthanol sur les fonctionnalités de la membrane cytoplasmique. A: activité ATPase-pompe à protons de la membrane cytoplasmique, B: diffusion libre de protons (ions  $H^+$ ). 1 : la cellule assure un maintien correcte de l'acidification intracellulaire en expulsant des protons dans le milieu, 2 : l'éthanol induit une entrée plus forte de protons par diffusion simple et inhibe fortement l'activité ATPase-pompe à protons ; l'intérieur de la cellule s'acidifie (faible valeur de pH ; forte concentration en protons) entraînant une baisse de la viabilité cellulaire pouvant aller jusqu'à la mort cellulaire (Salmon, 1998).

Cette représentation permet de mieux comprendre pourquoi la levure réalise le dernier tiers de la fermentation dans des conditions critiques : la levure doit alors en effet posséder un métabolisme très actif pour pouvoir compenser l'effet délétère exercé par la présence d'éthanol dans le milieu. Lorsque la concentration en éthanol est trop importante (excès de concentration en sucres du moût), l'œnologue peut donner une chance supplémentaire à la levure pour achever la fermentation alcoolique en renforçant la conformation des membranes cellulaires, afin de permettre aux levures de résister à l'effet délétère de l'éthanol.

Il est ainsi possible d'utiliser la propriété qu'ont les cellules de levure de mobiliser leurs réserves lipidiques lors de la réhydratation des levures Sèches Actives (LSA) pour retrouver rapidement des membranes cellulaires fonctionnelles. En effet, il a été ainsi montré que lors du processus de réhydratation des LSA, les cellules de levure peuvent facilement incorporer des stérols de levures naturelles spécifiques apportés de façon exogène lors de la première partie de la réhydratation (en assimilant ces stérols sous la forme de micelles (Soubeyrand *et al.*, 2005). Cette complémentation précoce des membranes de levures avec des stérols de levure lors de la réhydratation des LSA permet de maintenir la viabilité cellulaire même bien après le processus de fermentation, lorsque le niveau d'éthanol est à son plus haut.

Cette supplémentation de stérols lors de la phase de réhydratation des LSA est soutenue par un brevet européen déposé conjointement par l'INRA et LALLEMAND SAS (PCT 04-12309), et est décliné commercialement sous le nom générique de « NatStep » pour « natural sterol protection » (Salmon et Ortiz-Julien, 2008).

## 2.2 Maîtrise des températures de la benne à vendange au chai d'élevage

Les actions mécaniques engendrées par les étapes de récolte, transport, transfert vers le pressoir, éraflage et foulage, cycle de pressurage sont connues pour altérer l'intégrité des baies et donc favoriser le contact entre les pellicules et le jus. Ce sont surtout des étapes où la dissolution de l'oxygène dans le moût, une fois l'intégrité de la baie altérée, va permettre à l'activité polyphénoloxydase du raisin de réaliser un certain nombre de réactions d'oxydation touchant en premier lieu les acides hydroxycinnamiques, et conduisant à une forte modification de la composition chimique initiale du moût. L'une des incidences du réchauffement climatique sur la maturation du raisin conduira à une augmentation des teneurs en acides hydroxycinnamiques des moûts accompagnée par des teneurs plus faibles en glutathion (Schüttler *et al.*, 2013), rendant de ce fait les moûts plus sensibles à l'oxydation et au brunissement puisqu'un fort déséquilibre existera entre teneurs en acides hydroxycinnamiques et en glutathion (AH/GSH>3).

**Tableau 3** : Résumé des gains en oxygène consommé par oxydation des moûts à chaque étape technologique pour les modalités témoin et protégée.

	Oxygène consommé estimé (mg/L)		
	Modalité Témoin (20-21°C)	Modalité Protégée (7-10°C)	Différentiel
Récolte et transport de la vendange	0,7	0,2	- 0,5
Elaboration des premières presses	3,3	1,6	- 1,7
Elaboration des fins de presse	3,0	1,2	- 1,8
<b>Total</b>	7,0	3,0	- 4,0

Une étude récente a permis d'appréhender l'effet d'un abaissement de la température (par ajout de neige carbonique avec un abaissement moyen de température du moût de 11°C) sur ces phénomènes d'oxydation tout au long de l'élaboration du vin depuis une intervention à la benne à vendange jusqu'aux phases d'élevage (Frissant *et al.*, 2012). Contrairement à ce qui est généralement admis, l'effet protecteur contre l'oxydation d'une baisse de la température de la vendange n'est pas forcément le plus important pendant les étapes de récolte et de transport de la vendange vers la cave (Tableau 3).

C'est surtout pendant les opérations de pressurage que cet effet est vraiment flagrant, avec une efficacité plus forte sur les jus de fin de presse que sur les premières pressées. Cette observation donne en fait plusieurs pistes de réflexion sur la protection contre l'oxydation lors du pressurage : a) l'inertage complet d'un pressoir tel que développé par certains constructeurs peut être avantageusement remplacé par un abaissement de la température de la vendange et son maintien au cours du pressurage, b) la valorisation des fins de pressée peut également passer par un refroidissement spécifique de la vendange avec un gain qualitatif très fort. A la vue de l'ensemble de ces résultats, il apparaît nettement que l'abaissement de la température de la vendange exerce un fort ralentissement de l'activité polyphénoloxydase du raisin, sans que l'effet négatif d'une plus forte solubilité de l'oxygène dans le moût ne se fasse sentir.

Une seconde approche visait à quantifier l'apport de l'activité Polyphénol-oxydase du raisin (PPO) dans les phénomènes d'oxydation des moûts depuis la récolte du raisin jusqu'à la mise en fermentation. Les essais menés, analysés par un jury entraîné en analyse sensorielle, ont montré que la protection de l'oxydation des moûts de raisins blancs et rosés, pendant les phases pré-fermentaires par abaissement de la température des baies dès la récolte et inertage, et post-fermentaire par inhibition thermique des

enzymes oxydatives, conduit à de fortes différences sensorielles. La couleur des vins blancs est moins oxydée, celle des vins rosés est plus claire et plus rose pâle. Pour les descripteurs d'odeur, la protection pré-fermentaire est la plus marquante, mais son action positive est plus à nuancer. Les vins blancs ont des notes olfactives plus souffrées et animales, tandis que pour les vins rosés la dominante olfactive est plus qualitative avec des notes fruitées, florales, amyliques et végétales.

### 3. Traitements de correction des vins

#### 3.1 Réduction de la teneur en alcool

##### 3.1.1 Les technologies de désalcoolisation partielle des vins

Les techniques envisageables pour extraire l'alcool d'un vin peuvent être des méthodes thermiques ou non à l'appui de l'utilisation de membranes. Les procédés utilisables ont fait l'objet de revues de synthèse (Scott *et al.*, 1995 ; Pickering, 2000). Certains sont déjà utilisés à l'échelle industrielle : distillation sous vide (Mermelstein, 2000) ; colonne à cônes rotatifs (Makarytchev *et al.*, 2004) et osmose inverse (Bui *et al.*, 1986 ; Chinaud *et al.*, 1991.)

L'abaissement de la teneur en alcool des vins a été étudié expérimentalement dans le cadre d'un programme financé de 2006 à 2009 par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), intitulé « Vins De Qualité à teneur réduite en Alcool » (Escudier *et al.*, 2009). Dans le cadre de ce programme de recherche, différentes technologies applicables au cours du processus d'élaboration des vins ont été étudiées : i) la diminution de la teneur en sucre (traitement pré-fermentaire par le procédé RTS) (Cottureau *et al.*, 2006), ii) la désalcoolisation en cours de fermentation et, iii) la désalcoolisation des vins finis. Pour choisir le niveau de désalcoolisation, a été utilisé un des principaux résultats obtenu dans ce projet, à savoir que la réduction d'alcool dans un vin titrant entre 13% (vol) et 15 % (vol), n'est perceptible qu'à partir de 3% (vol) et qu'il n'y a pas de différence notable entre les sujets entraînés à la dégustation et les consommateurs (Urbano *et al.*, 2007 ; Meillon *et al.*, 2010).

Les traitements de désalcoolisation ont ainsi été conduits pour obtenir une réduction de 2% (vol), de façon à ce que les différences observées ne relèvent pas de la différence de teneur en alcool. Les résultats de trois années d'expérimentation intégrant les approches pré-fermentaire, fermentaire, et post-fermentaire du programme ANR VDQA ont fait l'objet d'une publication de synthèse (Aguera *et al.*, 2009) .

Les technologies suivantes ont été utilisées pour le traitement de désalcoolisation post-fermentaire, sur vin fini : (i) la distillation sous vide, (ii) le stripping, (iii) l'osmose inverse (OI) ou la nanofiltration (NF) couplée aux contacteurs à membrane (CM) ou à la distillation, (iv) les contacteurs à membrane (CM). Dans le cas des couplages de procédés à membranes, la première étape du procédé de désalcoolisation (osmose inverse ou nanofiltration) permet de séparer les constituants du vin en extrayant l'éthanol sous forme d'un perméat hydro-alcoolique. La seconde étape, avec le contacteur à membrane, permet d'extraire en partie l'éthanol du perméat selon le principe de l'évaporation osmotique, en utilisant de l'eau comme solvant, les pores de la membrane utilisée (matériau hydrophobe) étant remplis d'air. Les deux étapes sont conduites en continu, les perméats étant désalcoolisés au fur et à mesure de leur production et réintroduits au fur et à mesure dans le vin en cours de traitement (Figure 8).

Le contacteur à membrane est un carter de fibres creuses microporeuses (0,02 à 0,2  $\mu\text{m}$ ) en matériau hydrophobe.

Dans le cas des couplages de procédés à membrane à la distillation (OI-D et NF-D), les deux étapes ont les mêmes objectifs que pour les couplages de procédés uniquement à membranes, la distillation remplaçant l'étape de traitement par contacteur à membrane. La distillation permet contrairement aux contacteurs à membrane de désalcooliser totalement les perméats avant leur réintroduction dans le vin.

Lors de nos expérimentations, le couplage procédé à membrane/distillation a été conduit de façon séquentielle et non continu.

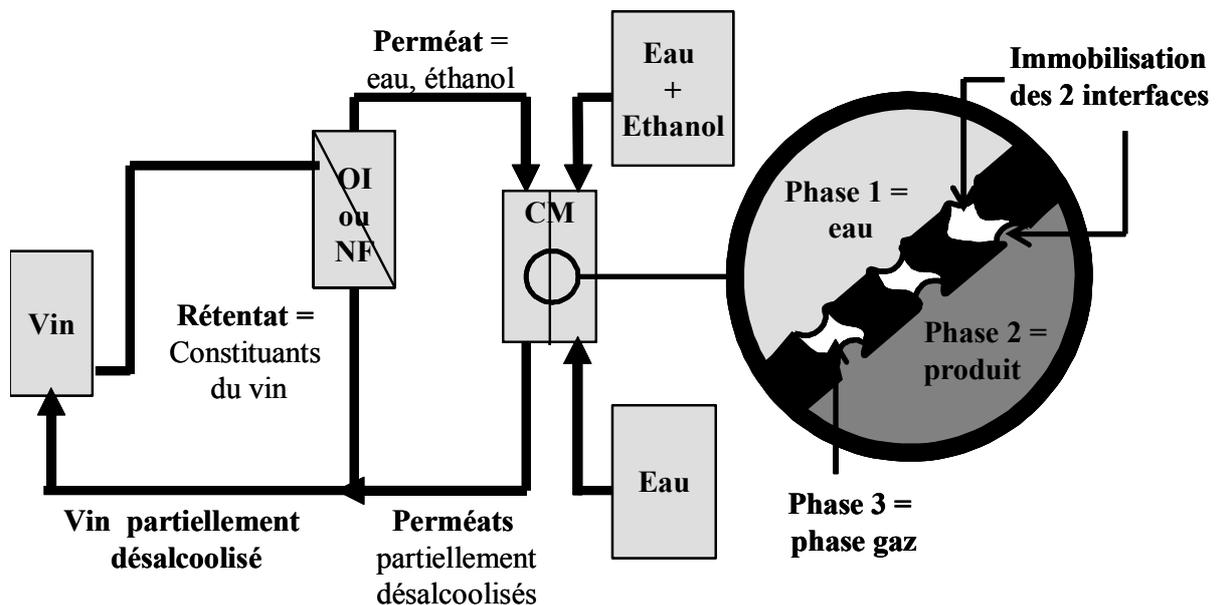


Figure 8 : Désalcoolisation par couplage de procédés membranaires.

### 3.1.2 Réduction du taux d'alcool par voie technologique et qualité des vins

Les vins élaborés dans le cadre de l'étude ANR VDQA ont été caractérisés par analyses physico-chimiques et analyses sensorielles. Le coefficient de variation de ces analyses est de l'ordre de 10%. L'analyse sensorielle a été réalisée sur les différents vins issus des expérimentations par un jury expert de 19 juges, en tests de différences tripartites et/ou en analyse descriptive. Les données ont été acquises à l'aide du logiciel FIZZ et traitées avec le logiciel XLstat.

Il apparaît dans le Tableau 4 que la nanofiltration en retenant moins de constituants du vin transfère plus d'éthanol dans les perméats.

Le traitement d'extraction de l'éthanol est donc plus rapide par nanofiltration que par osmose inverse. En revanche, cette dernière permet une meilleure rétention des composés volatils d'arômes dans le vin traité.

Tableau 4 : Comparaison Osmose Inverse/ Nanofiltration en désalcoolisation de 2% (vol) d'un vin à 14% (vol).

	Osmose Inverse	Nanofiltration
Degré du perméat	~10-11% (vol)	~13 % (vol)
Débit Alcool Pur (L/h.m <sup>2</sup> )	1,8	2,5
Composition du perméat	Eau, Potassium (traces), arômes (très faibles traces)	Eau, acides organiques, Potassium, arômes (alcools supérieurs, certains acétates et éthyl esters)
Avantages	Pertes en composés volatils très limitées	Traitement plus rapide

La concentration en éthanol dans les perméats étant supérieure lors d'un traitement en NF par rapport à l'OI, il en découle (Tableau 4) que les quantités de perméats à produire pour un même objectif de désalcoolisation sont supérieures en OI (Tableau 5). Le couplage au contacteur membranaire nécessite une production plus importante de volume de perméat que le couplage à la distillation. Le traitement du vin est donc plus long. Un traitement de désalcoolisation de 4% (vol) nécessiterait une production d'environ 27% de perméat en NF-D et près de 120% en NF-CM avec pour cette dernière une consommation d'eau de l'ordre de 0,6 L / L de vin. Ainsi, une limite raisonnable de traitement de désalcoolisation doit être fixée pour les procédés de couplage à membrane, elle se situe à -3% (vol) environ. Pour le couplage procédé à membrane/distillation la limite est plus basse, mais il reste à valider la qualité sensorielle finale dans ce cas.

**Tableau 5 :** Données comparatives des traitements en couplage désalcoolisation de 2% (vol) d'un vin à 14% (vol).

	OI-D	NF-D	OI-CM	NF-CM
Volume de perméat à produire par litre de vin (%)	~ 25	~ 18	~ 50	~ 30
Quantité d'eau nécessaire au traitement (L eau / L vin)	0	0	0,45	0,3
Nature du co-produit (effluent)	Alcool $\geq$ 92% (vol)		Eau alcoolisée (OI : ~ 4% (vol), NF : ~7% (vol))	

OI : Osmose Inverse, D : Distillation, NF : Nanofiltration, CM : Contacteur membranaire. Valeurs en italique = valeurs estimées par calcul.

Les sous-produits résultant du traitement sont de nature différente, le retraitement de l'eau alcoolisée du couplage à membrane doit être pris en compte. Le Tableau 6 regroupe les résultats d'analyses sensorielles de vins pour un seuil de désalcoolisation de 2% (vol).

**Tableau 6 :** Résultats d'analyses sensorielles en test tripartite, risque  $\alpha$  de la différence

Test	Syrah	Sauvignon Prémium	Syrah Prémium	Syrah Australienne
T / D	0,0074 <sup>a</sup>	0,1719 <sup>b</sup>	0,5207	0,7186
T / OI-CM	0,5207	0,0755	0,5207	0,7186
T / NF-CM	0,013 <sup>a</sup>	0,0273 <sup>a</sup>	0,1905	---
T / CM	---	0,1719 <sup>b</sup>	0,0376 <sup>a</sup>	0,1719 <sup>b</sup>
D / OI-CM	0,1905	0,0004 <sup>a</sup>	0,3385	0,0755
D / NF-CM	0,0648 <sup>a</sup>	0,0557	0,7186	---
OI-CM / NF-CM	0,5207	0,3992	0,4569	---
D / CM	---	0,0212 <sup>a</sup>	0,1076	0,5223
OI-CM / CM	---	0,3992	0,0919	0,1265
NF-CM / CM	---	0,2399	0,2233	---

<sup>a</sup> différence significative entre les 2 vins comparés ; <sup>b</sup> zone d'incertitude, tendance à la non différence.

Il apparaît que le traitement permettant d'obtenir un vin ne se différenciant pas du témoin est le couplage OI-CM. Le traitement par distillation permet aussi d'obtenir dans de nombreux cas, des vins proches du témoin. En revanche, le traitement direct par CM sans étape préalable d'osmose inverse ou

de nanofiltration conduit à la production de vins significativement différents du témoin. Il est à remarquer que globalement, les vins désalcoolisés par les différentes technologies ne sont pas significativement différents entre eux.

### **3.1.3 Réduction d'alcool et réglementation**

A la suite des travaux du programme VDQA, la désalcoolisation partielle des vins a été autorisée comme pratique œnologique en 2009, dans la limite de 2% (vol) retirés. Une révision récente de ce règlement ne définit plus cette pratique comme une désalcoolisation partielle mais comme une correction de la teneur en alcool. De plus, le niveau de correction a été révisé en 2013 et correspond maintenant à un taux de 20% du degré initial du vin (voir annexe réglementation ci-après). Ce taux de 20% correspond au seuil de perception de la correction d'alcool (Meillon *et al.*, 2010). L'INAO pour les vins AOP limite la possibilité de diminution du degré d'alcool à 2% (vol). Pour ces ajustements, il s'agit de pratiques œnologiques, elles ne font pas l'objet d'informations ni d'étiquetage particulier. Au-delà de 20% et jusqu'au degré minimum du vin (9% (vol)), l'information du consommateur sera nécessaire sur l'étiquetage.

L'analyse socio-économique des expériences professionnelles en cours, a permis de confirmer que l'accès aux techniques de désalcoolisation (Montaigne, 2012) ne constitue plus un verrou au développement des vins à teneur réduite en éthanol. Le traitement de correction de la teneur en alcool des vins est actuellement accessible pour les producteurs de vin par le biais de prestataires de services proposant de réaliser le traitement à façon sur le site de production (unité mobile de traitement, société Gemstab option tout membrane et société Paetzold, option couplage osmose inverse distillation).

### **3.2 Correction de l'acidité**

Le niveau du pH joue un rôle important sur les caractéristiques organoleptiques des vins ainsi que sur leur évolution, les pH élevés favorisant les phénomènes d'oxydation et les développements microbiens. L'élévation des pH des moûts et des vins constatée depuis une quinzaine d'années, notamment dans les zones viticoles aux étés secs et chauds, pose des problèmes accrus aux œnologues. C'est pourquoi dans ces circonstances, l'œnologue recherche les moyens techniques susceptibles d'abaisser le pH des vins. Les valeurs de pH jugées très fortes ne sont généralement pas dues exclusivement à un déficit de la teneur en acides organiques (qui sont des acides faibles) mais plutôt à un excès de cations et principalement le potassium (sel de base forte).

Par ajout d'acide tartrique, l'acidification est, en règle générale, une opération traditionnelle qui reste difficile à maîtriser. La prédiction du pH résultant est, de plus, aléatoire. Il a pu être constaté, par ailleurs, que l'excès d'acide tartrique rajouté comme « acidifiant » peut conduire à des vins qualifiés de durs, asséchants et métalliques.

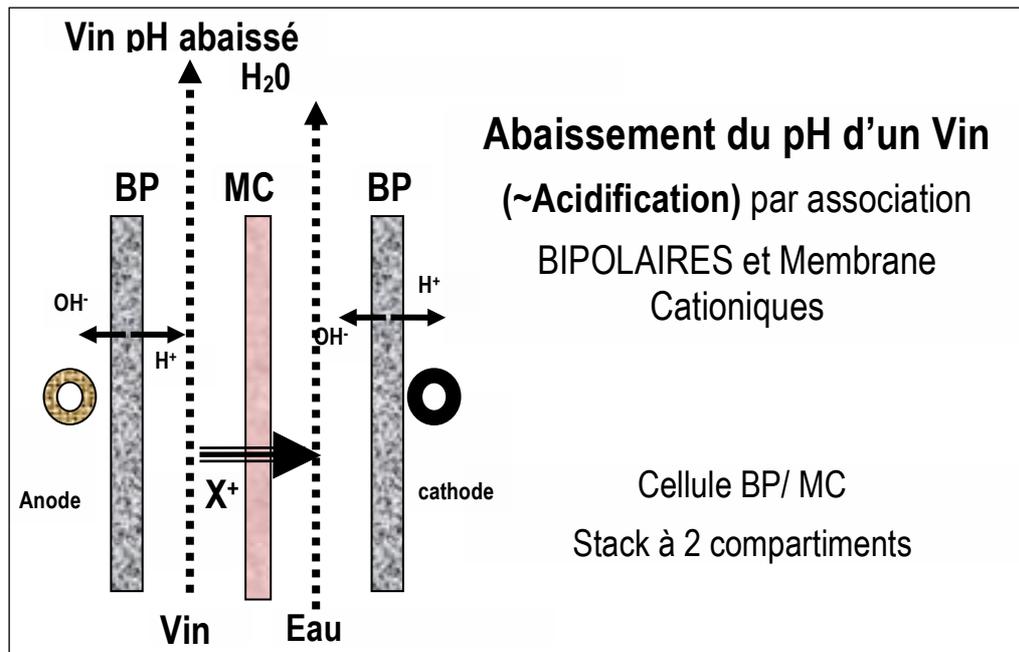
Compte tenu de l'équilibre de salification des acides organiques du vin, l'acidification doit viser à la modification du pH et non de l'acidité titrable comme l'a montré Usseglio-Tomasset (1989), ce qui revient à augmenter la proportion d'acides libres au détriment des formes salifiées. Les vins étant des solutions « tampons », car ils renferment essentiellement des acides faibles en présence de leurs sels de bases fortes, l'effet acidifiant sera la conséquence d'une diminution de l'alcalinité des cendres.

#### **3.2.1 Correction de l'acidité et maîtrise du pH à partir des procédés électro-membranaires**

L'acidification des vins peut maintenant être réalisée par voie électro-membranaire. Cette technologie a été mise au point à la suite du traitement de stabilisation tartrique des vins par électrodialyse, nouvelles approches de stabilisation des vins étudiées par l'Inra depuis 1994 (Moutounet *et al.*, 1994).

Les procédés électro-membranaires, dont le principe du fonctionnement a été décrit par Gavach (1998), permettent d'extraire des ions de solutions. Ils mettent en œuvre des membranes denses (non microporeuses) à perméabilité sélective. Ces membranes selon leur type (anionique, cationique, bipolaire) permettent le transfert uniquement d'anions ou de cations. Le transfert des ions est assuré

par l'application d'un courant électrique continu entre deux électrodes (différence de potentiel électrique). Les conditions opératoires hydrodynamiques simplifiées facilitent l'inertage lors du traitement pour la maîtrise de la dissolution d'oxygène dans le vin (Vidal *et al.*, 2003). La combinaison de membranes utilisée sur l'appareil de traitement (anionique/cationique, bipolaire/cationique ou bipolaire/anionique) détermine la nature de l'extraction ionique et par conséquent le champ d'application pour le traitement des vins. L'extraction spécifique des cations, essentiellement du potassium, à travers une membrane cationique et le déplacement des équilibres acido-basiques des sels organiques par la présence de la membrane bipolaire, induit une acidification du vin, contrôlé en continu par la mesure du pH (Figure 9).



**Figure 9 :** principe de l'acidification membranaire. MC = membrane monopolaire cationique ; BP = membrane bipolaire ;  $X^+$  = cations du vin.

Il résulte de ce traitement, une acidification du vin traité, par déplacement des équilibres acido-basiques des sels d'acides organiques du vin. Ce traitement d'acidification est maîtrisé et fiabilisé par le suivi en ligne du pH du vin.

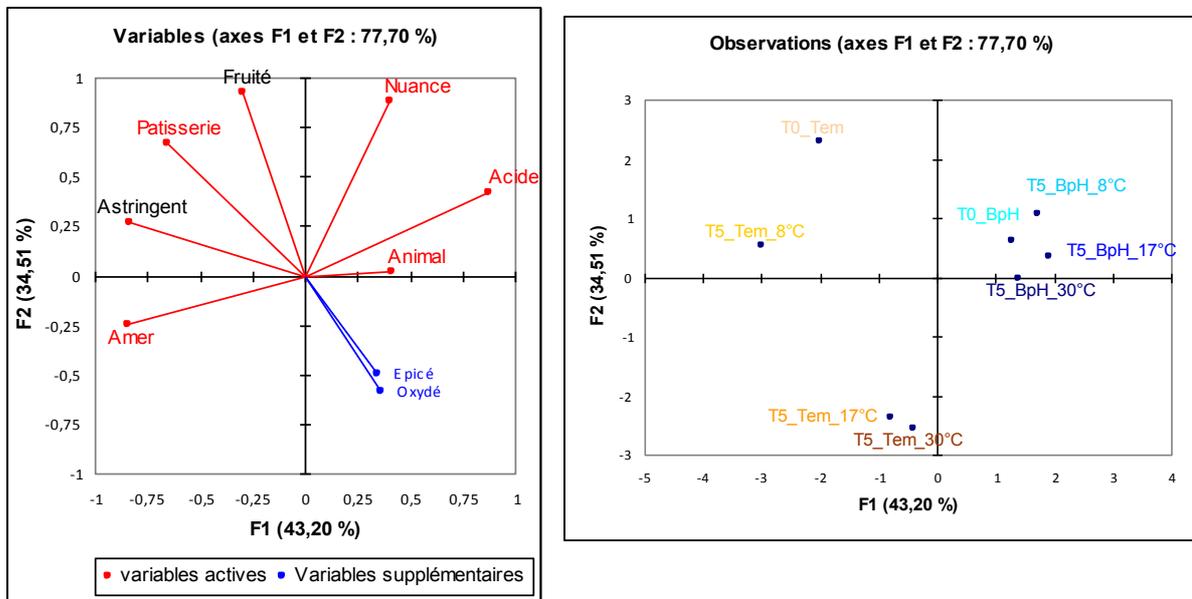
L'œnologue peut ainsi décider le pH à appliquer au vin en fonction de sa connaissance du vin traité (Lutin *et al.*, 2007) et de l'objectif commercial. Ceci se fait avec précision par un simple capteur en ligne, en l'occurrence un pH mètre. Les conditions de mise en œuvre de procédé sont proches de celles connues du procédé de stabilisation tartrique par électrodialyse, mais avec un empilement membranaire spécifique. Le traitement peut techniquement être réalisé sur moût centrifugé, vin centrifugé, vin bien soutiré après la fin des fermentations ou préfiltré à 25 microns. Ce nouveau procédé, sans ajouts d'additifs permet d'obtenir des vins plus acides dont les conditions d'évolution ont été analysées sur plusieurs qualités de vin rosé, rouge, blanc et à différentes températures de conservation (Escudier *et al.*, 2011).

A titre d'exemple représentatif, l'acidité totale d'un vin rouge expérimenté à l'Inra Pech- Rouge a été augmentée de 0,75 g/L ( $H_2SO_4$ ) en lien avec le fonctionnement de la membrane bipolaire qui a permis l'élimination de 35% des ions potassium en particulier. L'absorbance à 520 nm est significativement réévaluée suite au traitement, la couleur rouge est intensifiée. Le vin rouge a été conservé à 8°C, 17°C, et 30 °C et analysé sensoriellement dans le temps.

En analyse sensorielle, quatre descripteurs (odeurs animale, de pâtisserie, acidité et amertume) ont permis de différencier significativement les vins témoins des vins abaissés en pH. En effet, la baisse de pH fait que le jury perçoit le vin comme ayant une odeur plus animale, moins pâtisserie et plus acide et

moins amer. Contrairement aux vins abaissés en pH, on observe pour les vins témoins de forts effets liés au temps et à la température. Les vins perdent leur caractère pâtisserie pour gagner des caractères épicés et oxydés. De plus, la nuance de la couleur évolue de violet à orangé.

Pour les vins abaissés en pH, on n'observe aucune évolution en fonction du temps et de la température sur l'ensemble des descripteurs. Cela montre que le traitement procure au vin une stabilité (Figure 10).



**Figure 10 :** Perception sensorielle du vin rouge Témoin et acidifié par voie membranaire en fonction des conditions opératoires.

Dans un contexte global d'évolution climatique qui se traduit par une hausse régulière des pH des vins, l'impact spécifique du stress hydrique aggrave le plus souvent cette évolution (voir paragraphe 1). Ce traitement d'acidification assure, toute chose égale par ailleurs, une meilleure conservation du vin à température de conservation égale.

Plus généralement, un abaissement de pH exerce un effet significatif sur la perception organoleptique du vin, dans tous les cas au niveau acidité, mais selon les matrices sur les caractères oxydatifs des vins, et l'amertume avec une diminution de celle-ci, confirmant les premières publications et communications sur ces sujets (Moutounet *et al.*, 1994 ; Granès *et al.*, 2009 ; Muller *et al.*, 2007 ; Lutin *et al.*, 2007).

Le procédé électro-membranaire d'acidification des moûts et vins a été admis comme pratique œnologique par l'OIV en juin 2010 (fiches Oeno 360/2010 et 361/2010), puis autorisé par l'Europe le 21 janvier 2011 (règlement UE N°53/2011).

Depuis l'acceptation de ces procédés électromembranaires dans le milieu viticole, Oenodia/Eurodia a comptabilisé fin 2013, 164 unités d'électrodialyse correspondant à 500 réacteurs soit 30 000 m<sup>2</sup> de membranes installées. Le développement de cette activité initiée et réalisée dans le cadre d'un contrat de recherche EURODIA-INRA illustre par ailleurs ce que peut amener une collaboration étroite et réussie entre recherche publique et privée.

Le travail d'acidification peut être réalisé par unité mobile, sur tout site de production (opérateur société Gemstab, Marguerittes, France).

### **3.2.2 Correction de l'acidité avec les résines échangeuses de cations**

Il ne s'agit plus d'extraction d'ions, mais d'échanges d'ions avec les protons des solutions de régénération des résines (acide chlorhydrique en général) (Escudier *et al.*, 2012). La réglementation permet également depuis février 2013 l'utilisation des échangeurs cationiques (résines) pour l'acidification des vins. Cette approche est moins onéreuse en termes d'investissements que les procédés électro-membranaires. En revanche, elle génère des volumes et des compositions physico-chimiques d'effluents, liés à la régénération des résines, plus élevés. Ceci est de plus en plus pris en compte dans l'évaluation globale du procédé (Escudier *et al.*, 2012). Le traitement en ligne est rendu plus difficile, car la résine fixe l'ensemble des cations du vin jusqu'à sa saturation et nécessite alors une régénération pour poursuivre le traitement. Anciennement développées aux USA et Australie sur vins de table, ces technologies par résines tendent à être abandonnées dans les pays du nouveau monde, mais elles suscitent pour leur faible coût d'investissement un intérêt nouveau dans les pays producteurs traditionnels de vin.

Les récents avis de l'OIV admettent deux options pour ce traitement par résine: ajout direct de résine dans la cuvée aux doses requises, traitement en batch par résine, mais avec réincorporation nécessaire du vin traité par résine avec le vin non traité, dans les proportions requises pour assurer la correction d'acidité décidée par l'oenologue du vin. Il s'agit d'un traitement « low cost », proposé au départ par l'Espagne pour acidifier plus spécifiquement les vins de base avant prise de mousse.

## **Conclusion**

La vigne, plante pérenne, subit et s'adapte sur ses sols et terroirs à des situations climatiques dont nous connaissons maintenant le devenir sur une période cumulée de 15 ans. Ceci se caractérise au moins sur le pourtour méditerranéen par une situation de stress hydrique marqué pour de nombreuses vignes. Il est assez difficile scientifiquement de bien séparer les conséquences d'un stress hydrique prolongé du contexte global d'évolution climatique sur ces mêmes quinze années, contexte climatique qui influe aussi sur la vigne et sur les mêmes composés. Des données bibliographiques par exemple sur les conséquences du stress hydrique sur la teneur en sucres peuvent paraître parfois contradictoires. L'étude de cas présentée ici démontre tant sur le raisin que sur le vin l'effet du stress hydrique sur le poids des baies, une teneur en sucre du moût légèrement plus faible qu'à partir de vigne irriguée, une acidité réduite aggravant l'évolution observée depuis 15 ans, et des teneurs augmentées en anthocyanes, polyphénols, composés glycosylés en C6 et azote.

Au global, cette étude confirme ce qui est noté dans la bibliographie : les vins issus de raisins et vignes en situation de stress hydrique prolongé, et vinifiés classiquement sont au niveau organoleptique différents et moins bien équilibrés. Ceci impose à l'oenologue d'adapter ses pratiques avec un ensemble de leviers décrits et analysés dans cette étude.

Il s'agit donc que des vins produits en moindre quantité ne soient pas en plus dépréciés qualitativement. C'est une des missions de l'oenologue concernant des vendanges issues de vignes en situation de stress prolongé, que d'adapter la qualité finale du vin à ces objectifs.

## **Références bibliographiques**

Aguera E., Athes-Dutor V., Bes M., Caille S., Cottureau P., Escudier J.L., Mikolajczak M., Roy A., Sablayrolles J.M., Samson A., Souchon I., Vidal J.C., 2010. Reduction of wine alcohol content: a comparative study of different technologies. Bulletin OIV 83, 32-42.

Barbeau G., 2008. Influence du fonctionnement de la vigne sur la qualité du vin. VI forum mondial del vino. Logrono, avril 2008.

- Bui K., Moulin D.R., Galzy P., 1986. A reverse osmosis for production of low ethanol content wine. *Am. J. Enol. Vitic.*, 37, 4, 297-300.
- Cottureau P., Solanet D., Vuchot P., Ferment E., Noilet P., 2006. Réduction de la teneur en sucre des moûts, 20<sup>ième</sup> congrès international de la vigne et du vin, Logrono (Espagne).
- Escudier J.L., Mikolajczak M., Bes M., 2008. Chauffage de la vendange : les technologies disponibles et les méthodes de vinification associées. *Revue Française d'œnologie* 229, 9-18.
- Escudier J.L., Bouissou D., Caille S., Samson A., Bes M., Moutounet M., 2011. Membrane-Based options to regulate pH and acidity. *Proceedings of the 16th international enology symposium*, Bolzano.
- Escudier J.L., 2009 site <http://www1.montpellier.inra.fr/pechrouge/images/vdqa.pdf#page=1>, résumé du programme ANR VDQA
- Escudier J.L., Cauchy B., Lutin F., 2012. Wine acidification and wine stabilisation by subtractive technologies : comparison between ions exchange resins and membrane ion extraction. *PAV*, N°13-14, 324-341.
- Eudier L., Samson A., Caille S., Aguera E., Bes M., Dangleville G., DE Viegler L., Salmon J.M., 2011. Le décanteur centrifuge Alfa-Laval : apport d'un nouvel outil pour le prétraitement de la vendange thermotraitée avant fermentation. *Revue des Œnologues* 138, Janvier 2011, 18-20.
- Frissant S., Delmas C., Souquet J.M., Samson A., Salmon J.M., 2012. Management de la température de la vendange depuis la vigne jusqu'à la mise en fermentation : étude quantitative de la protection obtenue contre l'oxydation. *Rev. Œnologues* 145 spécial, 21-25.
- Flanzy C., 1973. La vinification par macération carbonique. Groupe de travail Macération Carbonique, Ed S.E.I, Inra Versailles, 118 pages.
- Flanzy C., Samson A., Boulet J.C., Escudier J.L., 2001. Vins de garde élaborés par macération carbonique. *Revue française d'œnologie* 191, 20-24.
- Gavach C., 1998. Les séparations par membranes dans les procédés de l'industrie alimentaire. In : Daufin G. (Ed.) *Electrodialyse.. Tec et Doc Lavoisier* Paris. pp. 86-96
- Goutouly J.P., 2009. Impacts du changement climatique sur la vigne et le raisin. *Rev. Fr. Œnologie* 235, 23-26.
- Granes D., Bouissou D., Lutin F., Moutounet M., Rousseau J., 2009. L'élévation du pH des vins : causes, risques œnologiques, impacts de la mise en œuvre de moyens d'acidification. *Bulletin de l'OIV*, 82, 57-70
- Kovac V., Alonso E., Bourzeix M., Revilla E., 1992. Effect of several enological practices on the content of catechins and proanthocyanidins of red wine. *J. Agric. Food Chem.* 40,1 1953-1957.
- Lutin F., Boissier B., Bonneau D., Le Gratiet Y., 2007. Alternative au tartrage des vins, l'acidification par électrodialyse bipolaire. 8<sup>ème</sup> Symposium International d'Œnologie Bordeaux 25/27 juin 2007
- Makarytchev S.V., Languish T.A.G., Fletcher D.F., 2004. Mass transfer analysis of spinning cone columns using CFD. *Chem. Eng. Res. Des.*, 82 (6) 752.
- Marais J., van Wyk C.J., Rapp A., 1992. Effect of sunlight and shade on norisoprenoid levels in weisser Riesling and Chenin blanc grapes and weisser wines maturing Riesling. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 13(1), 23-31.
- Meillon S., Urbano C., Shlich P., Juin 2010. Goût et acceptabilité des vins à teneur réduite en alcool. *Rev. des œnologues* 136, 52-54.
- Mermelstein N.H., 2000. Removing Alcohol from Wine. *Food Technol.* 54, 11, 89.
- Montaigne E., Salmon C., Cottureau P., 2013. Coûts des nouvelles techniques de désalcoolisation. *Colloque IFV Narbonne*, 30/1/2013.
- Moutounet M., Escudier J.L., Saint-Pierre B., 1994. L'électrodialyse, adaptation à la stabilisation tartrique des vins. In : Donèche B. (Ed), *Les acquisitions récentes dans le traitement des vins*. Lavoisier Tech et Doc Paris, 103-115.
- Pickering G.J., 2000. Low-and reduced-alcohol wine: a review. *Journal of Wine Research* 11(3), 129.

- Muller K., Picou E., Souquet JM., Moutounet M., Cheynier V., Samson A., 2007. The influence of pH and late micro oxygenation on sourness, bitterness, and astringency of red wine. 2007. 8eme Symposium d'œnologie de Bordeaux.
- Ollat N., Touzard J.M., 2014. Impacts and adaptation to climate change: new challenges for the French wine industry. J. Int. Sci. Vigne Vin N° Special Laccave, 75-78.
- Pons A., Lavigne V., Darriet P., Dubourdiou D., 2012. Identification et impact organoleptique de la massoa lactone dans les raisins du cépage Merlot et les vins rouges. In : Actes de colloques du 9<sup>ème</sup> symposium international d'œnologie de Bordeaux (OENO 2011), Dunod, pp. 851-854.
- Sa-Correia I., Van Uden N., 1986. Ethanol-induced death of *Saccharomyces cerevisiae* at low and intermediate growth temperatures. Biotechnology and Bioengineering 28, 301-303.
- Salmon J.M., 1998. Relations levure – milieu. In : Flanzy C. (Ed.), Œnologie - fondements scientifiques et technologiques, Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, pp. 415-444.
- Salmon J.M., Ortiz-Julien A., 2008. Millora de la fermentacio alcoholica en condicions extremes. ACE Revista d'Enologia 84, 18-22.
- Schüttler A., Fritsch S., Hoppe J. E., Schüssler C., Jung R., Thibon C., Gruber B. R., Lafontaine M., Stoll M., de Revel G., Schultz H. R., Rauhut D., Darriet P., 2013. Facteurs influençant la typicité aromatique des vins du cépage de *Vitis vinifera* cv. Riesling. Aspects sensoriels, chimiques et viticoles. Rev. Œnologues 149S, 36-41.
- Scott J.A., Cooke D.E., 1995. Continuous gaz (CO<sub>2</sub>) stripping to remove volatiles from an alcoholic beverage. Journal of the American Society of Brewing Chemists 53, 63.
- Soubeyrand V.; Luparia V., Williams P., Doco T., Vernhet A., Ortiz-Julien A., Salmon J.M., 2005. Improvement of the fermenting capacity of active dry yeast (ADY) by solubilized sterols during rehydration. J. Agric. Food Sci. 53, 8025-8032.
- Tilloy V., Ortiz-Julien A., Dequin S., 2014. Reduction ethanol and improving glycerol yield by adaptative evolution of *Saccharomyces cerevisiae* wine yeast under hyperosmotic conditions. Appl. Environ. Microbiol. 80 (8), 2623-2632.
- Urbano C., Dupressoir C., Samson A., Cordelle S., Guillot G., Schlich P., 2007. R-index and triangular tests to determine the perception threshold of a reduction of alcohol content in wine. 7th Pangborn Sensory Science Symposium – Minneapolis USA.
- Usseglio-Tomasset L., 1989. Chimie Œnologique. Ed Lavoisier Paris.
- Vidal J.C., Boulet J.C., Moutounet M., 2003. Les apports d'oxygène au cours des traitements des vins. Bilan des observations sur site. 2<sup>ème</sup> partie. Revue Française d'œnologie 201
- Zamora F., 2014. Adapting red winemaking to climate changes conditions. J. Int. Sci. Vigne Vin N° Special Laccave, 69-74