REFLEXIONS SUR LES CAUSES ET LES CONSÉQUENCES DES ARRÊTS DE LA FERMENTATION ALCOOLIQUE EN VINIFICATION

OBSERVATIONS RELATED TO THE CAUSES AND CONSEQUENCES OF STUCK FERMENTATION IN VINIFICATION

P. RIBÉREAU-GAYON

Faculté d'Œnologie, Université Victor Segalen Bordeaux 2,
351 cours de la Libération, 33405 Talence cedex (France)

Résumé : Les graves dangers des arrêts de la fermentation alcoolique en vinification sont bien connus. La connaissance de leurs causes permet de proposer les principales interventions susceptibles de les prévenir. Si malgré tous les soins apportés, on observe des difficultés, on peut en chercher l'interprétation dans une situation particulière, liée à une constitution spécifique du moût. Mais il est recommandé de rechercher d'abord l'intervention éventuelle de facteurs humains mal maîtrisés.

Abstract : The serious dangers arising if premature arrest of alcoholic fermentation (stuck fermentation) occurs are well known. If sugar is present, bacteria development may increase volatile acidity.
There are several reasons explaining why such phenomena are more common today : 1) higher levels of alcohol ; 2) the more widespread use of closed vats for red wine where there is no contact with the air ; 3) intensive clarification of white musts ; 4) better management of problems related to difficult ends of fermentation.
Apart from insufficient yeasting and nutritional deficiencies (nitrogen), the causes of premature arrest are as follows. In red wines : 1) inadequate sulphiting of the harvest leading to early development of lactic bacteria ; 2) poorly controlled or excessive temperature, especially during yeast growth ; 3) insufficient aeration of yeasts during their growth. In white wines : 1) must extraction which is too rapid or excessive clarification ; 2) inadequate aeration ; 3) excessive temperature variations (thermal shocks).
If difficulties occur despite adequate precautions, the reasons for this may be found in the specific constitution of the must. However, a more likely cause may be human error.

Mots clés : fermentation, vinification, arrêt de fermentation, aération des moûts, contrôle de la température, carences nutritives, inhibition

Keywords : fermentation, winemaking, stuck fermentation, aeration of must, control of temperature, nutrient starvation, inhibition

INTRODUCTION

Les arrêts de la fermentation alcoolique sont de plus en plus souvent identifiés en vinification ; par conséquent, compte tenu des dangers certains qu'ils peuvent engendrer, il s'agit d'un problème d'une grande actualité (FLEET, 1992 ; BOULTON *et al.*, 1995 ; FLANZY, 1998 ; RIBÉREAU-GAYON *et al.*, 1998).

Cette plus grande fréquence des arrêts de la fermentation est probablement vraie pour certaines vinifications en blanc, dans lesquelles les conditions de l'extraction des moûts, en particulier leur forte clarification par le débourbage, débouchent sur des difficultés de fermentation qui d'ailleurs sont de mieux en mieux maîtrisées.

Par contre, dans le cas de l'élaboration des vins rouges, les difficultés de fermentation alcoolique sont bien connues depuis longtemps, tout au moins dans les vignobles pratiquant des cuvaisons longues en cuves fermées, avec des vendanges ayant des degrés alcooliques potentiels relativement élevés. Il s'agit du cas typique du vignoble bordelais. Mais ce type de vinification est aujourd'hui en expansion dans de nombreux autres vignobles qui ont modifié leur encépagement et le mode de conduite de la vigne, avec des avantages qualitatifs certains, mais aussi en augmentant le risque de difficultés de fermentation.

1 : E-mail ??

J. Int. Sci. Vigne Vin, 1999, **33**, n°1,
©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

Par ailleurs l'attention, apportée aujourd'hui au contrôle des vinifications, permet une meilleure prise en compte des fins de fermentations languissantes, qui n'étaient pas toujours considérées, dans le passé, comme des situations de difficultés fermentaires, telles qu'elles sont parfaitement identifiées aujourd'hui, à juste titre d'ailleurs.

Nous essayerons de dégager dans cette rédaction les causes susceptibles d'intervenir dans ces arrêts de fermentation ; il est vraisemblable que la réalisation parfaite de toutes les conditions nécessaires diminuerait considérablement, et peut-être même supprimerait complètement, les causes des arrêts de la fermentation.

En tout cas, les discussions concernant les arrêts de la fermentation doivent prendre en compte la richesse en sucre des moûts. Une intervention peut se traduire par une accélération momentanée de la cinétique fermentaire ; en conséquence, la fermentation se termine plus vite si la quantité de sucre faible (par exemple inférieure à 200 g/l) n'est pas un facteur limitant. Par contre, si la teneur en sucre est trop élevée (par exemple supérieure à 230 g/l), la même intervention peut se traduire par une augmentation de la vitesse momentanée de la fermentation, sans pour autant améliorer les conditions de son achèvement. Un exemple bien connu est celui de l'effet de la température ; lorsque la température augmente (de 25 à 35°C par exemple) la fermentation va plus vite, mais elle s'arrête plus tôt, dans la mesure tout au moins où la richesse en sucre est un facteur limitant. Il n'est pas exclu que d'autres interventions puissent agir de façon identique.

Egalement l'arrêt de la fermentation est rarement la conséquence d'une cause unique ; le plus généralement il est la résultante de l'addition de plusieurs causes qui chacune individuellement serait insuffisante. Par exemple, le fait qu'une fermentation puisse aller dans un cas jusqu'à son terme à une température supérieure à 30°C ne signifie pas que cette même valeur est sans incidence dans d'autres situations.

CONSÉQUENCES ET DANGERS DES ARRÊTS DE LA FERMENTATION

La conservation des vins doux, contenant du sucre non fermenté, imposent des conditions microbiologiques adaptées pour assurer leur conservation sans refermentation. Dans le cas des vins blancs secs et des vins rouges, l'absence de sucre participe à la stabilisation. Cette circonstance est suffisante pour chercher à éviter les arrêts de fermentation et relancer les fermentations arrêtées.

Mais surtout, dans le cas où l'on recherche la fermentation malolactique (les vins rouges et certains vins blancs secs), le grave danger de l'arrêt de la fermentation alcoolique est le risque d'abandonner un milieu sucré à l'action des bactéries lactiques, d'autant plus à craindre que la stabilisation biologique totale ne peut pas être recherchée, compte tenu de la nécessité de relancer la fermentation arrêtée. À partir des sucres, les bactéries lactiques sont susceptibles de former de l'acidité acétique ; l'augmentation consécutive de l'acidité volatile peut affecter considérablement la qualité.

On connait bien aujourd'hui l'intervention des différents processus fermentaires en vinification ; les bactéries doivent se développer uniquement lorsque tout le sucre a été transformé en éthanol par la levure. Dans ces conditions, l'acide malique est le premier métabolite qu'elles peuvent dégrader par la fermentation malolactique. De ce schéma (figure 1) découle parfaitement la nécessité de mettre en œuvre toutes les conditions susceptibles d'éviter l'arrêt prématuré de la fermentation alcoolique. La compréhension de ces mécanismes est relativement récente (1960) ; complétée par les méthodes analytiques simples permettant de suivre

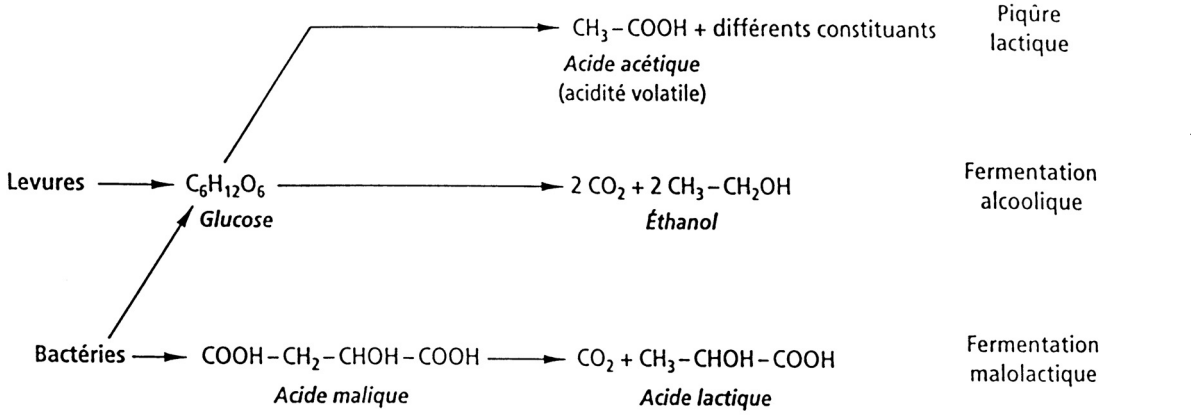


Fig. 1 - Intervention en vinification en rouge des différents phénomènes microbiens (RIBÉREAU-GAYON *et al.*, 1998)

Fig. 1 - The various microbiological processes involved in red wines vinification (RIBÉREAU-GAYON *et al.*, 1998)

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

l'évolution des sucres (mesure de la densité, dosage chimique ou enzymatique), de l'acide malique (chromatographie) et de l'acidité volatile (dosage chimique), elle a permis des améliorations qualitatives considérables ; elle marque le début de l'œnologie préventive moderne. L'acidité volatile moyenne des grands crus de Bordeaux qui était de l'ordre de 0,9 g/l (en H_2SO_4) dans les années 1920 est passée aujourd'hui à 0,4.

INCIDENCE DE LA RICHESSE EN SUCRE DU MOÛT

Le degré alcoolique potentiel, directement lié à la richesse en sucre du moût, est la première cause des difficultés de fermentation. Au-dessous de 11 p. cent vol. d'alcool potentiel, on n'observe pas de difficultés majeures, quelles que soient les autres conditions de la vinification. Ces difficultés peuvent devenir sérieuses à partir de 12,5 p. cent vol. À la fin du siècle dernier, on l'a noté dans le vignoble bordelais, les années de grande maturité, avec de grandes richesses en sucre des moûts, n'ont pas donné les résultats escomptés (1895) parce que des fermentations difficiles ont débouché sur des accidents bactériens, provoquant des augmentations excessives de l'acidité volatile.

L'apport de sucre dans la vendange, sous forme de moût concentré ou par chaptalisation, a un effet identique. On admet en outre un accroissement des risques de fin de fermentations difficiles si cet apport se fait trop tard au cours de la fermentation, alors que la population levurienne est partiellement inhibée par la présence d'éthanol.

Indépendamment de l'effet toxique de l'éthanol, dans les moûts de degré potentiel élevé, la présence d'un taux de sucre important gêne aussi la multiplication des levures dès le début des processus fermentaires.

INCIDENCE DE L'AÉRATION

La fermentation est la vie sans air ; contrairement à la respiration, le métabolisme des glucides fait intervenir des réactions qui n'impliquent pas la présence d'oxygène. On sait que la levure est capable de développer un processus respiratoire ; mais il est inhibé lorsque la teneur en sucre est importante. Néanmoins, on connait aussi la nécessité de la présence d'oxygène pour assurer une bonne multiplication cellulaire et assurer le maintien de l'activité fermentaire. La fermentation n'est pas possible dans un milieu en anaérobiose stricte, ensemencé par un levain précultivé à l'abri complet de l'air.

La fementation du sucre est particulièrement active pendant la phase de croissance qui fait passer la population environ de 10^6 à 10^8 cell/ml. Mais cette phase n'est pas suffisamment longue pour assurer la transformation complète du sucre en éthanol. L'achèvement complet de la fermentation repose sur l'activité d'une population levurienne en situation de survie.

L'apport d'oxygène améliore la fermentation : 1) en augmentant la population maximale ; 2) en prolongeant la capacité fermentaire des cellules. La cellule utilise l'oxygène pour la biosynthèse de stérols qui sont des facteurs de survie, assurant la perméabilité des membranes.

Au moment d'un arrêt de la fermentation, on observe le maintien de l'activité enzymatique à l'intérieur des cellules. Mais l'altération de la perméabilité des membranes ne permet plus la pénétration des molécules de substrat (sucre) et l'élimination des produits du métabolisme (éthanol et CO_2).

Tous ces faits expliquent que l'intérêt de l'aération du moût en fermentation ait été reconnu depuis longtemps ; une telle pratique, introduite en Bordelais à la fin du siècle dernier, a été généralisée beaucoup plus tard à la suite d'une étude théorique fondamentale déjà ancienne (J. RIBÉREAU-GAYON *et al.*, 1951). Ce travail, aujourd'hui oublié bien que souvent confirmé, montre clairement l'importance de l'introduction d'oxygène, par saturation au contact de l'air à l'occasion d'un remontage ; il montre aussi une meilleure utilisation, par la levure, de cet apport d'oxygène, s'il intervient au début du processus fermentaire, lorsque la population est en phase de croissance ; l'oxygène introduit plus tard possède une efficacité plus faible voire nulle (figure 2).

De ces résultats découlent des conséquences bien connues qui montrent qu'un remontage avec aération, réalisé au deuxième jour qui suit le départ en fermentation, permet d'obtenir, dans une cuve fermée (anaérobiose), la même cinétique fermentaire que dans une cuve ouverte (semi-aérobiose), avec l'avantage d'éviter les pertes d'éthanol par évaporation et les risques de piqûre acétique en fin de fermentation, lorsque la disparition du CO_2 n'assure plus la protection vis-à-vis de l'oxygène de l'air.

La quantité d'oxygène nécessaire, au deuxième jour de fermentation, était estimée à 8,5 mg/l correspondant approximativement à la saturation par agitation du milieu au contact de l'air. Les dispositifs de microbullages devraient permettre aujourd'hui une introduction d'oxygène beaucoup plus précise, en fonction des besoins estimés.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

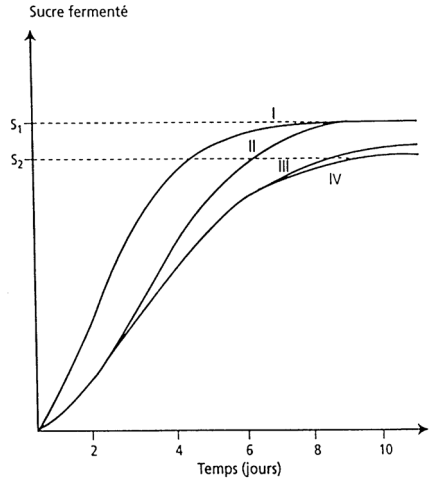


Fig. 2 - Exemple de l'effet d'une aération momentanée, par remontages à différents moments, sur la cinétique de la fermentation (RIBÉREAU-GAYON et *al.*, 1998)

I – cuve ouverte en aérobiose permanente ; la totalité du sucre du moût S1 est fermentée ;
II – cuve fermée ; aération au 2e jour par remontage ; la fermentation est accélérée, par rapport à l'anaérobiose stricte et va jusqu'à son terme
III – cuve fermée ; aération au 6e jour ; l'accélération de la fermentation est insignifiante ;
IV – cuve fermée en anaérobiose stricte ; dans ce cas la fermentation s'arrête pour une quantité de sucre fermentée S2 inférieure à S1.

Fig. 2 - An exemple of the effect of instant aeration, by pumping-over, on the fermentation cinetic (RIBÉREAU-GAYON *et al.*, 1998)

I – with permanent aeration
II – with an instant aeration at the second day
III – with an instant aeration at the sixth day
IV – without aeration

Le remontage à l'air en début de fermentation reste un des moyens les plus efficaces à la disposition du vinificateur pour éviter les arrêts de fermentation, surtout dans le cas des moûts riches en sucre ; encore faut-il qu'il soit correctement conduit, au bon moment et avec une dissolution d'oxygène satisfaisante qui suppose l'éclatement de la veine liquide au large contact de l'air. Ce procédé est largement utilisé en vinification en rouge. On a pu craindre une oxydation excessive des moûts blancs ; pour cette raison il est moins général. Pourtant la protection par CO_2 des moûts en pleine fermentation est suffisante ; la mise en œuvre de ce procédé est avantageusement généralisable à la vinification en blanc ; le même effet peut être obtenu par injection directe d'oxygène.

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

L'incidence de la température sur la marche de la fermentation est bien connue. Par rapport à une température modérée (20 à 25°C), une température élevée (30 à 35°C) accélère la vitesse de la fermentation, mais augmente le risque d'un arrêt prématuré de la fermentation, dans la mesure où le taux de sucre est suffisamment élevé.

Bien entendu, il n'existe pas une température limite au-dessus de laquelle la fermentation n'est plus possible. On admet que la levure commence à souffrir à partir de 30°C et l'intérêt de ne pas prendre le risque de dépasser cette valeur, même si une fermentation peut se dérouler parfaitement bien à température plus élevée, dans la mesure où toutes les autres conditions (en particulier la richesse en sucre) sont favorables.

La fermentation alcoolique est un phénomène exothermique ; par conséquent, les cuves ont tendance à s'échauffer. Cet échauffement dépend de la richesse en sucre, de la vitesse de la fermentation, de la dimension de la cuve et de son matériau (bois, béton, acier) qui assure plus ou moins bien la dispersion des calories. Évidemment, la température maximale atteinte dépend aussi de la température initiale du moût. À température exagérément basse (12 à 14°C), la fermentation est lente, la multiplication cellulaire ralentie. Une telle situation a pu être recommandée en vinification en blanc ; en réalité, une température aussi basse n'est pas nécessaire pour respecter la finesse des arômes et elle augmente considérablement les difficultés fermentaires. Par contre, en vinification en rouge, on peut avoir intérêt à réchauffer la cuve. Mais réciproquement, à température initiale élevée (T > 25°C), le départ en fermentation devient rapide et l'échauffement intervient en phase de croissance de la population levurienne, au moment où les cellules sont les plus sensibles à une température excessive ; certaines souches résistent moins bien que d'autres. Ce phénomène peut intervenir dans des difficultés de fin de fermentation. Par conséquent, en vinification en rouge, il est certes recommandé de réchauffer une cuve dont la température initiale est trop basse, mais il ne faut pas non plus dépasser une valeur de l'ordre de 20°C ; tout au contraire, si cette température initiale est trop élevée, on peut avoir intérêt à refroidir la vendange, pour éviter une montée de température trop brutale. Toujours en vinification rouge, si on estime que 30°C est une température insuffisante pour avoir une extraction satisfaisante des composés phénoliques, on peut envisager de laisser monter la température au-dessus de cette valeur, mais exclusivement en fin de fermentation, ou même après la fermentation (macération finale à chaud).

À propos du contrôle de la température, un autre phénomène à prendre en compte concerne les variations éventuelles de cette température à laquelle la levure est sensible. Les premières observations, concernant cette incidence des « chocs thermiques », ont été faites dans les années 1970 ; on venait de comprendre

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

la nécessité, pour la vinification des vins blancs aromatiques, d'une température de fermentation modérée (de l'ordre de 20°C). L'absence de dispositif de réfrigération efficace avait conduit à privilégier les cuves en acier, éventuellement placées à l'air libre. Mais, dans ces conditions, l'apparition des premiers froids de l'automne, au milieu du mois d'octobre, entrainait des écarts de température non négligeables entre le jour et la nuit. Dans ces conditions, les fins de fermentation pouvaient devenir difficiles, même pour des degrés alcooliques modérés ; d'ailleurs, on a plusieurs fois observé qu'elles se terminaient mieux lorsque le vin en fermentation était transféré dans des cuviers correctement thermostatés. Une autre remarque de même nature concerne certaines cuves dans lesquelles la fermentation est régulièrement plus lente que dans les autres cuves du même cuvier ; il peut s'agir de cuves situées dans le courant d'air des portes qui engendre des variations de température.

Ces observations ont été complétées par des études en laboratoire. La fermentation d'un moût contenant 220 g/l de sucre est complète en 50 jours à 19°C et en 93 jours à 12°C ; mais si, après la fermentation des 40 premiers grammes de sucre, le milieu en fermentation est transféré de 12 à 19°C et surtout de 19 à 12°C, la fermentation s'arrête en laissant du sucre non fermenté.

Le danger des chocs thermiques peut se manifester aussi en vinification en rouge ; pour obtenir la fermentation complète d'une vendange riche en sucre (degré alcoolique potentiel 13,5 p. cent vol.), il est recommandé de choisir une température pas trop élevée (26 à 28°C) et parfaitement constante ; avec un levurage adéquat et une bonne aération des levures en phase de croissance, cette précaution est généralement suffisante.

INCIDENCE DES FACTEURS NUTRITIFS

Pour assurer correctement la transformation du sucre en éthanol, la levure a des besoins nutritifs bien précis. L'alimentation carbonée est fournie par les sucres du moût. Il lui faut aussi une alimentation azotée qui peut provenir des acides aminés du moût et plus simplement des sels ammoniacaux puisqu'elle a la capacité d'introduire l'ion NH_4^+ dans les molécules organiques.

Le rôle de l'azote et l'intérêt d'une supplémentarité azotée en vinification ont donné lieu à un nombre considérable de publications dont il n'est pas toujours facile de tirer une synthèse précise, compte tenu de la diversité de réalisation des expériences et également de la constitution initale des moûts, c'est-à-dire de l'existence d'une éventuelle carence azotée.

Le plus généralement, on a admis, tout au moins dans les vignobles septentrionaux et les années où les températures au cours de la maturation ne sont pas trop élevées, que les moûts sont suffisamment riches en azote et que l'addition de sels ammoniacaux n'est pas indispensable. Certaines situations de fermentation difficiles, par exemple les vendanges de vieilles vignes ou des vignobles enherbés, laissent supposer la possibilité de carences azotées.

Effectivement, différentes observations conduisent à préconiser l'addition de sels ammoniacaux pour améliorer la cinétique fermentaire ; un tel ajout présente en outre l'avantage de diminuer la formation d'acidité volatile par la levure, qui passe par exemple de 0,30 à 0,15 g/l (en H_2SO_4). Dans d'autres situations par contre (en absence de carence azotée), on observe bien une accélération de la vitesse de fermentation qui se termine plus tôt, si la teneur en sucre n'est pas un facteur limitant ; mais, pour des teneurs en sucre plus élevées, on n'observe pas d'améliorations significatives de la fin des fermentations qui s'arrêtent avant épuisement complet du sucre.

Ces divergences d'appréciation ne résultent probablement pas d'erreurs expérimentales, mais plutôt d'application à des situations différentes, concernant en particulier la teneur des moûts en azote assimilable (NH_4^+ et acides aminés, sauf proline). On admet généralement que pour des teneurs, exprimées en N, d'azote assimilable inférieures à 160 mg/l, l'apport de sels d'ammonium est nécessaire ; cet apport est souhaitable pour des teneurs comprises entre 160 et 200 mg/l ; il n'est plus nécessaire au-dessus de 300 mg/l. Pour l'azote ammoniacal, la teneur minimum au-dessous de laquelle l'apport de sels d'ammonium est recommandé se situe à 20 mg/l (toujours exprimée en N). Mais cette question mériterait d'être précisée, peut-être en prenant mieux en compte les formes d'azote présentes et leur capacité d'assimilation par la levure. D'ailleurs, certains auteurs pensent que la dose limite de 30 g/hl de sulfate ou de phosphate d'ammonium autorisée par la législation européenne, n'est pas toujours suffisante pour rétablir une fermentation normale dans les moûts les plus carencés.

Lorsqu'on discute l'incidence d'une addition de sels ammoniacaux, il faut considérer aussi, à côté de la richesse en sucre du moût, la présence éventuelle de stérols, ou d'oxygène qui assurent leur synthèse. Ces substances agissent comme facteurs de survie, c'est-à-dire qu'elles participent au maintien de la capacité fermentaire des levures, sans pour autant accroître la

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

population maximum. De telles substances sont apportées par les parties solides des raisins en vinification en rouge, également par les bourbes en blanc. Ces substances augmentent la consommation d'azote par la levure en fermentation. On peut agir sur leur teneur par l'introduction d'oxygène, avec pour conséquence une incidence sur les effets d'une addition de sels ammoniacaux.

Une autre question concerne le moment propice pour une addition d'azote. Pour de nombreux auteurs, il est préférable d'intervenir au départ de la fermentation, au moment où les levures, en phase de croissance, réagissent le mieux aux différentes sollicitations ; pour d'autres, le moment le plus propice se situe à mi-fermentation, et il est recommandé de coupler cette addition avec une introduction d'oxygène. Il a été recommandé aussi d'effectuer l'addition d'azote en deux fois.

D'autres éléments nutritifs sont nécessaires à la levure, en particulier les facteurs de croissance, dont le plus connu est la thiamine (vitamine B1) ; effectivement, on peut observer une accélération de la cinétique fermentaire par addition de thiamine dans des expériences de laboratoire (50 mg/hl) ; mais une telle addition a rarement une réelle efficacité lorsqu'elle est effectuée dans la pratique des cuviers. La même remarque concerne les différents activateurs de la fermentation qui ont pu être proposée, généralement à base d'autolysats de levure.

INCIDENCE DES PHÉNOMÈNES D'INHIBITION

La fermentation alcoolique forme des quantités importantes d'éthanol qui est un antiseptique puissant. Finalement, l'éthanol provoque l'arrêt de la fermentation ; mais en fonction de toutes les autres conditions, la teneur en éthanol toxique varie dans de larges proportions, entre 12 et 16 p. cent vol. par exemple.

En outre, la levure s'auto-inhibe également par la synthèse d'acides gras saturés en C6 et C8 qui agissent à des concentrations de l'ordre du mg/l. Une expérience significative a permis la mise en évidence de l'action de ces produits secondaires de la fermentation. Si l'on prépare des milieux de fermentation qui varient seulement par leur teneur en éthanol, la croissance des levures et la transformation du sucre sont d'autant plus faibles que le taux d'éthanol est élevé. Si l'on prépare maintenant des milieux de fermentation de composition identique, mais dont l'éthanol provient, soit d'une addition du produit pur, soit d'une première fermentation, l'activité fermentaire est plus faible dans les seconds milieux parce que la première fermentation a formé d'autres inhibiteurs (acides gras) que l'éthanol. Ces acides gras à courte chaîne agissent en perturbant la perméabilité des membranes. On explique ainsi l'efficacité, sur la marche de la fermentation, d'une addition d'enveloppes cellulaires de levures qui agissent en éliminant les acides gras, donc en détoxifiant le milieu ; elles agissent éventuellement aussi en apportant des corps de la famille des stérols (acides gras à longue chaîne) ; elles constituent certainement l'activateur de la fermentation le plus efficace actuellement connu.

Le moût de raisin peut contenir d'autres inhibiteurs de la fermentation, en particulier des sous-produits du développement des parasites de la vigne. Il est bien connu que la faible fermentescibilité des moûts de pourriture noble provient, pour une part, d'une substance antibiotique, identifiée à un polysaccharide synthétisé par *Botrytis cinerea*. D'autres inhibiteurs inconnus doivent pouvoir exister naturellement dans le raisin ; avec d'éventuels activateurs spécifiques, ils pourraient intervenir dans la plus ou moins grande fermentescibilité des moûts, en fonction de l'origine des raisins.

Enfin, la présence de résidus de pesticides, utilisés pour la protection du vignoble, est identifiée parmi les causes des difficultés de fermentation alcoolique. Les efforts réalisés, au cours des dernières années, pour limiter, par une lutte raisonnée, ces traitements à ceux absolument indispensables, a diminué les risques de cette nature.

INCIDENCE DE LA CLARIFICATION DES MOÛTS DE VENDANGES BLANCHES

Cette question est aujourd'hui bien connue ; la vinification d'un vin blanc aromatique suppose la fermentation d'un moût clarifié ; non seulement les bourbes apportent des goûts végétaux, mais encore la levure, fermentant un moût propre, forme des arômes plus fins, plus riches en esters et contenant moins de dérivés soufrés. Mais d'un autre côté, la fermentation d'un moût parfaitement clarifié peut devenir extrêmement difficile.

On admet que le débourbage a plusieurs effets sur la cinétique fermentaire ; d'abord cette opération entraîne une élimination du levurage naturel, mais il peut être facilement compensé ; également les sédiments bourbeux servent de support aux levures qui acquièrent une meilleure activité fermentaire ; enfin les bourbes apportent des nutriments lipidiques (stérols) qui sont des facteurs efficaces de la marche de la fermentation.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

Ces observations ont conduit à préconiser un contrôle physique de la clarification des moûts avant leur mise en fermentation, par la mesure de leur trouble (turbidité exprimée en NTU). La clarification idéale peut varier en fonction du cépage, des conditions d'extraction des moûts et du type de vin ; on admet généralement une fourchette de 100 à 250 NTU. En dessous, la fermentation peut devenir difficile et déboucher sur un arrêt de fermentation ; au-dessus, les risques de déviations aromatiques sont certains.

Des résultats significatifs sur la marche de la fermentation ont été obtenus en ajoutant, dans un moût clarifié de fermentation difficile, les bourbes fines provenant d'un moût de fermentation plus facile.

INOCULATION LEVURIENNE ET PHÉNOMÈNES D'ANTAGONISME ENTRE SOUCHES

On admet que l'inoculum initial, pour un départ et une cinétique de fermentation satisfaisants, est de 10^6 cell/ml. Un tel inoculum est atteint spontanément dans les cuves de vinification en rouge, tout au moins après quelques jours de réception des vendanges dans le cuvier. Par contre, les conditions actuelles de travail des moûts blancs (propreté, réfrigération, clarification) ne permettent pas d'atteindre une telle inoculation ; le levurage est devenu indispensable dans tous les cas.

Indépendamment de la recherche d'un taux d'inoculation satisfaisant, le levurage, avec une souche sélectionnée, peut être recherché pour éviter l'intervention de souches naturelles susceptibles de provoquer des défauts (production de dérivés soufrés ou d'acétate d'éthyle) ; on peut également utiliser une souche sélectionnée pour la révélation d'arômes variétaux (Sauvignon). La sélection des souches en fonction de leurs caractéristiques (résistance aux températures élevées ou au contraire basses, résistance à l'éthanol…) devrait faire de nouveaux progrès dans les années à venir.

Mais dans cette opération de levurage, il faut être atttentif à éviter les phénomènes d'antagonisme entre souches (phénomène Killer) qui peuvent affecter la marche de la fermentation ; on a pu observer des fermentations plus lentes après levurage, par rapport à des témoins non levurés, mais qui possèdaient naturellement un inoculum suffisant. Le levurage suppose une faible population indigène, éventuellement inhibée par un sulfitage adapté. Il est certain que l'implantation d'une levure sélectionnée est plus aisée dans un moût blanc que dans une vendange rouge foulée.

ANTAGONISME ENTRE LES LEVURES ET LES BACTÉRIES LACTIQUES. INCIDENCE DE LA FERMENTATION MALOLACTIQUE

L'intervention de phénomènes d'antagonisme entre les levures et les bactéries lactiques dans les difficultés de la fermentation alcoolique, tout au moins en vinification en rouge, n'est probablement pas toujours correctement appréciée.

La succession des phénomènes est la suivante. Dans tous les cas, la fermentation alcoolique démarre en premier. Par la suite, on peut observer, pour une raison ou pour une autre, une diminution de l'activité levurienne, avant la transformation complète des sucres. Les bactéries lactiques peuvent connaître alors un premier développement parce que leur inhibition par le sufitage initial de la vendange n'a pas été suffisante. Le développement bactérien accentue l'inhibition des levures ; la fermentation malolactique intervient. Dans certains cas, les deux fermentations se terminent simultanément sans problème, en particulier sans augmentation notable de l'acidité volatile, parce que la dégradation de l'acide malique se fait en phase de croissance des bactéries, pendant laquelle elles ne synthétisent pas d'acide acétique. Mais dans d'autres cas, l'intervention des bactéries inhibent complètement l'activité levurienne ; la conséquence est un arrêt de la fermentation, d'autant plus dangereux que, dans de telles conditions, il est particulièrement difficile de relancer la fermentation arrêtée et l'on peut toujours craindre une augmentation préjudiciable de l'acidité volatile.

Le raisonnement précédent n'est pas compatible avec la pratique, mise en œuvre dans certains vignobles, de l'ensemencement avec des bactéries lactiques, avant l'achèvement de la fermentation alcoolique, lorsque le milieu est encore pauvre en éthanol ; certes, on accélère ainsi le démarrage de la fermentation malolactique, mais aussi on augmente les risques de déviations bactériennes qui n'ont peut-être pas toujours été correctement appréciés.

Pour éviter une telle situation, non seulement il ne faut pas augmenter la population bactérienne par ensemencement, mais encore il faut inhiber l'inoculum naturel. La solution consiste à effectuer un sulfitage approprié de la vendange fraîche ; il doit être suffisant pour retarder l'intervention des bactéries et laisser aux levures le temps de fermenter la totalité du sucre ; mais il ne doit pas non plus être trop élevé, afin de ne pas la retarder exagéremment et que la fermentation malolactique puisse se dérouler dans un délai raisonnable.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

Les doses de SO_2 à mettre en œuvre dans la vendange fraîche dépendent des vignobles, des cépages, de l'acidité et du climat. Pour la région bordelaise, on peut considérer qu'elles sont comprises entre 3 et 7 g/hl en fonction de la température, du pH et de l'état sanitaire. L'homogénéisation parfaite de la solution sulfureuse est une autre recommandation importante.

En tout cas, il est certain que l'absence de sulfitage de la vendange rouge au remplissage de la cuve (ou un sulfitage insuffisant) augmente les risques de fins de fermentation alcoolique difficiles ; une telle pratique est déconseillée ; elle a été identifiée, dans différentes circonstances, comme cause d'arrêt prématuré de la fermentation alcoolique.

Un sulfitage doit intervenir dans le cas d'un arrêt de fermentation ; il est destiné à éviter les augmentations excessives d'acidité volatile ; mais il sera généralement insuffisant pour permettre la fermentation complète du sucre dans une cuve arrêtée.

LE RÔLE DES FACTEURS HUMAINS

L'intervention des facteurs humains dans l'interprétation des difficultés de fermentation en vinification est rarement prise en compte.

Cependant, on rencontre assez régulièrement des cuviers dans lesquels ces difficultés sont endémiques et interviennent à peu près régulièrement chaque année, même avec des degrés alcooliques qui ne sont pas excessifs. En principe, toutes les précautions d'usage sont prises et on en vient à supposer qu'il s'agit d'une situation spécifique, avec une vendange particulièrement difficile à fermenter, pour laquelle il manquerait une explication théorique et qui justifierait un programme de recherche particulier. Pourtant, ces difficultés disparaissent complètement à l'occasion du remplacement du maître de chai, par son départ à la retraite par exemple. Bien des professionnels sont conscients de cette situation et n'hésitent pas à affirmer que les difficultés de la fermentation alcoolique en vinification sont liées avant tout à des opérations mal conduites, par erreur ou par omission.

Bien entendu, on doit s'interroger sur la nature de ces opérations qui peuvent induire, à l'improviste, des arrêts de fermentation, en prenant en compte l'augmentation des difficultés lorsque le taux initial de sucre, donc le degré alcoolique potentiel, augmente.

En vinification en rouge :

1) Absence de sufitage de la vendange, avec développement prématuré des bactéries lactiques.

2) Température mal contrôlée. Dans une cuve, la température est hétérogène, surtout en l'absence de remontage (on peut observer plusieurs degrés d'écart entre deux points d'une même cuve) ; elle est la plus élevée sous le chapeau de marc, là où la fermentation est la plus active et la population levurienne la plus importante. Il faut également éviter une augmentation trop rapide de la température, au début de la fermentation, lorsque la population est en phase de croissance ; les vendanges froides doivent donc être réchauffées avec beaucoup de prudence. Enfin, les variations brutales de température ne sont pas recommandées.

3) Aération insuffisante. Le remontage avec une profonde aération doit permettre de dissoudre suffisamment d'oxygène pour les besoins de la population levurienne en phase de croissance. Ceci suppose un débit pas trop grand et un contact suffisant entre la veine liquide et l'air, prenant en compte l'important dégagement de dioxyde de carbone. Les dispositifs de microbullage doivent permettre une introduction mieux contrôlée de l'oxygène ; l'apport d'oxygène doit intervenir pendant la phase de croissance, tout particulièrement au 1er, au 2^{e} et éventuellement au 3^{e} jour qui suivent le départ en fermentation.

En vinification en blanc :

1) Extraction du moût trop rapide et sa clarification trop poussée (manque de stérols provenant des parties solides du raisin).

2) Manque d'oxygène pour assurer une croissance levurienne satisfaisante.

3) Trop grandes variations de la température (chocs thermiques).

À ces recommandations, il faut ajouter le levurage, surtout important en vinification en blanc, et l'apport d'éléments nutritifs (azote) dans le cas de carences.

INTERVENTION EN CAS D'ARRÊT DE FERMENTATION

Relancer une fermentation arrêtée en vinification en blanc pose toujours des problèmes difficiles à résoudre.

Dans le cas de la vinification en rouge, on peut différencier deux situations. D'une part, la fermentation peut s'arrêter brutalement en laissant généralement une teneur en sucre relativement élevée (> 15 g/l), par suite d'un échauffement excessif ; généralement, la reprise de la fermentation est relativement simple, après refroidissement et ensemencement avec une cuve achevant normalement sa fin de fermentation. D'autre part, la

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

fermentation peut s'arrêter progressivement, en laissant peu de sucre non fermenté (entre 5 et 10 g/l) ; le milieu est devenu difficilement fermentescible, surtout si un développement bactérien est intervenu, éventuellement avec la fermentation malolactique ; la reprise de fermentation devient beaucoup plus laborieuse.

Dans le cas d'un arrêt de fermentation, l'écoulage avec un sulfitage léger (3 g/hl) peut être recommandé pour éviter les développements bactériens, tout au moins pour limiter leurs effets.

L'inoculation d'un vin en arrêt de fermentation n'est pas une opération simple. On peut utiliser les lies d'une cuve dans laquelle la fermentation se termine normalement, mais l'efficacité n'est pas garantie. On peut encore envisager le mélange avec du moût en pleine fermentation, ou même avec de la vendange fraîche ; cette opération se conçoit uniquement dans la mesure où on peut noyer la cuve en arrêt de fermentation dans un volume important du moût en pleine fermentation. Autrement, on a toujours le risque de voir la fermentation repartir, mais s'arrêter à nouveau avant la disparition complète du sucre résiduel.

Les levures sèches actives, non acclimatées à l'éthanol, sont inefficaces dès que le degré alcoolique dépasse 9 à 10 p. cent vol.

La préparation d'un levain devient nécessaire ; celui-ci doit apporter des levures actives (10^6 cell/ml) en fin de phase de croissance, sans pour autant augmenter de manière excessive le taux de sucre. La meilleure solution consiste à abaisser le titre alcoolique d'un volume de vin en arrêt, au-dessous de 9 p. cent vol. ; on ajuste le taux de sucre à 10 ou 15 g/l, avec éventuellement addition de 20 g/hl d'enveloppes cellulaires ; on sulfite si cette opération n'a pas déjà été faite et on ensemence à 20 g/hl de levure sèche active, ayant une bonne capacité fermentaire et sans propension particulière à la production d'acidité volatile. Lorsque pratiquement tout le sucre a disparu, les levures se trouvent en fin de phase de croissance ; l'inoculation se fait autour de 5 p. cent dans l'ensemble de la cuve en arrêt de fermentation. La température doit être de l'ordre de 20 à 25°C ; les températures les plus élevées peuvent accélérer la reprise de la fermentation, mais aussi elles accroissent les risques d'augmentation de l'acidité volatile. On peut également opérer par amplification progressive du levain (pied de cuve) ; mais l'opération suppose de disposer de volumes adaptés pour éviter les cuves en vidanges. En tout état de cause, l'opération est longue et laborieuse.

Enfin, on peut compléter l'ensemencement par l'apport de facteurs nutritifs (azote) ou d'enveloppes cellulaires qui lèvent les phénomènes d'inhibition.

Il a été signalé que le chauffage des moûts (flash-pasteurisation, quelques secondes entre 70 et 75°C), en particulier ceux qui sont en arrêt de fermentation, accélère la marche de la fermentation, permet d'éviter les arrêts de la fermentation et de relancer les fermentations arrêtées. Cette observation mériterait une interprétation théorique ; on a imaginé un remaniement de la structure colloïdale ou, plus vraisemblablement, l'hydrolyse de molécules complexes (protéines) qui libèrent, dans ces conditions, des nutriments des levures (acides aminés).

CONCLUSION

L'arrêt de la fermentation alcoolique en vinification est un accident grave. En effet, le développement de bactéries lactiques dans un milieu sucré peut conduire à une formation anormalement élevée d'acidité volatile ; pour cette raison, l'intervention des bactéries lactiques et la fermentation malolactique doivent intervenir lorsque la totalité du sucre a été fermentée par la levure. Par ailleurs, la reprise d'une fermentation arrêtée est toujours une opération laborieuse, surtout si la fermentation malolactique est intervenue.

Différentes causes peuvent expliquer que l'on observe aujourd'hui un plus grand nombre de cas d'arrêt de fermentation, par rapport au passé : 1) les degrés alcooliques potentiels sont en moyenne plus élevés ; 2) les cuves de fermentation en rouge fermées (abri de l'air) sont généralisées ; 3) la clarification plus poussée des moûts de vendange blanche a été rendue nécessaire par le traitement des vendanges à l'aide d'appareillage de grand débit, producteurs de bourbes ; 4) les responsables des vinifications sont plus attentifs à l'observation des fins de fermentations difficiles.

En tenant compte de ces réserves, il n'est pas tout à fait certain que les arrêts de fermentation soient proportionnellement plus nombreux aujourd'hui qu'ils l'étaient autrefois ; de nombreuses régions viticoles sont confrontées à ce problème depuis longtemps.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOULTON R.B., SINGLETON V.L., BISSON L.F. et KUNKEE R.E., 1995. *Principles and Practices of wine-making*. The Chapman and Hall Enology Librairy, New-York.

FLANZY C., 1998. *Œnologie. Fondements scientifiques et technologiques*. Lavoisier Tec & Doc ed., Paris.

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

FLEET G.H., 1992. *Wine microbiology an biotechnology*. Harwood Academic Publishers, Chur, Suisse.

RIBÉREAU-GAYON J., PEYNAUD E. et LAFOURCADE S., 1951. *Ind. Agric. Alim.*, p 141.

RIBÉREAU-GAYON P., DUBOURDIEU D., DONÈCHE B. et LONVAUD A., 1998. *Traité d'Œnologie. Tome 1. Microbiologie du vin. Vinifications*. Dunod ed., Paris.

Reçu le 7 janvier 1999 ;
accepté pour publication 25 février 1999

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)