REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : INFLUENCE DE LA COMPOSITION AZOTÉE DES MOÛTS SUR LA QUALITÉ DES VINS ET EAUX-DE-VIE. RELATIONS AVEC LES ARÔMES ET LES DÉFAUTS

INFLUENCE OF MUST NITROGEN COMPOSITION ON WINE AND SPIRIT QUALITY AND RELATION WITH AROMATIC COMPOSITION AND DEFECTS - A REVIEW

G. FERRARI

Station viticole du Bureau national interprofessionnel du Cognac, 69 rue de Bellefonds, B.P. 18, 16101 Cognac cedex, France

Résumé : Le développement dans plusieurs vignobles de pratiques viticoles (enherbement, réduction des fumures azotées) destinées à améliorer la maîtrise de la production et la protection de l'environnement a favorisé l'apparition de carences azotées plus ou moins sévères dans les moûts. Divers problèmes de fermentations sont alors apparus : vitesse lente, arrêts, acidité volatile, H_2S, déviations aromatiques… À l'opposé, il a été mis en évidence que des moûts très riches en azote pouvaient être à l'origine de vins contenant des molécules potentiellement dangereuses pour la santé humaine : amines, carbamate d'éthyle.
De nombreuses études ont fait état des effets des fumures azotées et de l'enherbement sur la vigne et la composition des moûts, mais les conséquences sur la qualité des vins et eaux-de-vie ont été peu étudiées. Cette étude bibliographique est une mise au point sur ces aspects.

Abstract: The development of wine-growing practices (reducing of nitrogen supply, grass cover) in order to improve the production control and environment protection lead to nitrogen deficiencies in must. Many fermentation problems appeared : stuck and sluggish fermentation, aromatic deviation. In opposite, it was underscored that must with high nitrogen content could lead to wine containing potentially dangerous molecules for human health, like amine and ethyl carbamate.
Many studies related the nitrogen fertilisation and grass cover effects on vine and must composition, but just a few works were done about their consequences on wine and spirit quality.
The quantitative aspects of alcoholic fermentation are now well know as the yeast nitrogen requirements (140 à 160 mg/l N). But yeast has also qualitative requirement (amino acids, vitamins, fatty acids), in relation with the medium (t°, O_2, turbidity).
In case of nutrient lack, even slight, yeast produce volatile acidity, H_2S and many sulphur compounds (origin of aromatic defects), and fermentation rate is slowed, sometime stopped. The yeast strains play an important role because of genetic differences and specific nutrient requirements. On the other hand, the possibility of enhancing wine aroma appears with the control of the nitrogen content of must which induce mainly ester and higher alcohols formation. Furthermore, it must keep in mind that large amount of must nitrogen (> 1,000 mg/l) could also lead to problems with wine composition.
Sensory analyses show correlations between must nitrogen content and soil management with wine quality. It seems that must with medium nitrogen give the better wines.
The aim of this study was to resume the actual experimental knowledge on this subject.

Mots clés : azote, qualité, moût, vin, eaux-de-vie, composés aromatiques.

Key words: nitrogen, quality, must, wine, spirits, aromatic composition.

INTRODUCTION

L'arôme des vins blancs non muscatés est constitué essentiellement de composés produits par les levures au cours de la fermentation alcoolique. Pour réaliser celle-ci, les levures ont besoin d'oxygène et de sucre, mais aussi de composés azotés variés, ainsi que de vitamines et d'éléments minéraux. Or, si ces éléments se trouvent généralement dans les moûts, leurs teneurs sont très variables (CORDONNIER, 1966) et peuvent donc influencer de façon importante le déroulement de la fermentation et les composés formés, tant en qualité qu'en quantité (DELFINI, 1999). Ceux-ci appartiennent à plusieurs familles : acides, alcools (BIDAN,

*Correspondance : gferrari@bnic.fr

J. Int. Sci. Vigne Vin, 2002, **36**, n°1, 1-10
©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

1975), esters (CANTAGREL, 1982), aldéhydes, cétones, composés soufrés et azotés (HENSCHKE, 1991). Leur influence peut être positive (composés d'arômes) ou négative (H_2S, thiols, amines, urée, carbamate d'éthyle…).

Au cours de ces dernières années, différentes pratiques viticoles (enherbement, réduction des fumures azotées) se sont développées dans de nombreux vignobles pour répondre à plusieurs objectifs : maîtrise des rendements, réduction des intrants, respect de l'environnement, avec pour conséquence une baisse de la teneur en azote des moûts, elle-même à l'origine de difficultés fermentaires (LÖHNERTZ, 1996 ; SOYER, 1996 ; LARCHEVÈQUE, 1999) et de dépréciations des vins.

Il apparaît donc indispensable de gérer précisément la problématique de l'azote tout au long de la filière d'élaboration : de la vigne jusqu'au verre, en passant par les transformations intermédiaires (prise de mousse, distillation…).

Une littérature abondante est disponible sur ce sujet, mais les résultats sont extrêmement variables selon les régions, les cépages, les méthodes de vinifications. Peu de travaux vont jusqu'à l'analyse fine des vins et des eaux-de-vie, et leur analyse sensorielle.

Nous avons donc essayé de faire une brève synthèse pour extraire les grandes tendances.

LES COMPOSÉS IMPLIQUÉS ET LEURS VARIATIONS

I - EFFETS QUANTITATIFS

Des seuils de concentration en azote dans le moût ont été déterminés pour assurer une bonne fermentation alcoolique, ce qui reste avant tout l'objectif principal du vinificateur (130 à 160 mg/l d'azote facilement assimilable par les levures, 20 mg/l d'NH_4).

En deçà de ses seuils, il y a d'abord un risque de fermentation languissante, puis celui-ci peut aller jusqu'à l'arrêt de fermentation, avec présence de sucres réducteurs en quantité plus ou moins importante. Dans les deux cas, la qualité du vin est altérée, avec le plus souvent des teneurs en acidité volatile importantes.

Au-delà, des teneurs en azote excessives dans le moût (< 1 000 mg/l) peuvent générer des problèmes avec la production par les levures de composés indésirables, dont certains pourraient s'avérer potentiellement dangereux pour la santé humaine.

II - EFFETS QUALITATIFS

1. Composés néfastes

a) Composés soufrés

Il est couramment admis aujourd'hui qu'une carence, même très limitée quantitativement ou qualitative (certains acides aminés) en azote assimilable du moût, peut provoquer des déviations aromatiques dans le vin fini, car les levures peuvent alors dégrader des acides aminés soufrés (méthionine, cystéine) en H_2S, composés soufrés : thio-ethers, thiols, etc.

Les levures produisent toujours ces composés, mais à de très faibles quantités, inférieures aux seuils de détection olfactifs (HENSCHKE, 1991). Dès que la carence azotée augmente et notamment la déficience en ion ammonium, la levure accumule des sulfures (S^{--}), plutôt à partir des sulfites (SO_2) que des sulfates (SO_4^{--}). Le niveau de formation de sulfures est régulé par la demande cellulaire en acides aminés soufrés. Il existe aussi plusieurs rétro-régulations de ces métabolismes.

Des différences de production de H_2S entre souches ont été confirmées et ce point est devenu un critère important de sélection des levures œnologiques, de même que le potentiel de production de SO_2.

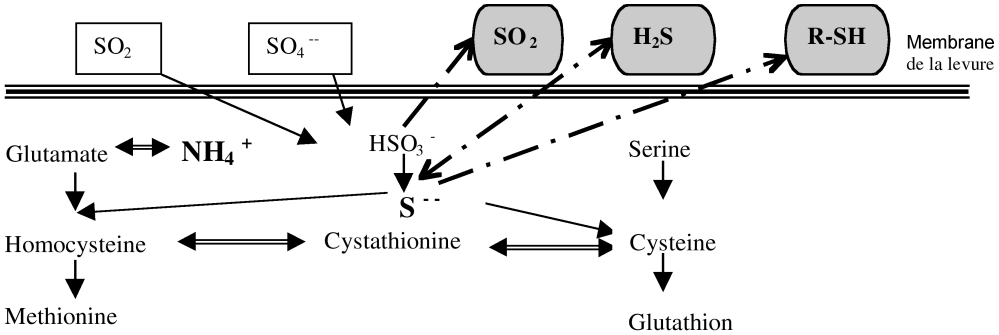


Figure 1 - Voies métaboliques simplifiées des composés soufrés dans la levure (d'après HENSCHKE, 1993)

Metabolic pathway of sulfur compounds in yeast

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

Des travaux récents montrent des corrélations entre les teneurs en méthionine (acide aminé soufré), l'azote ammoniacal des moûts (figure 2) et la formation de H_2S (SPIROPOULOS, 2000).

Pour de faibles concentrations du moût en méthionine, l'effet de la supplémentation en azote sur la production de H_2S est limité (tableau I). Cela pourrait expliquer l'efficacité relative de certains ajouts d'ammonium constatés parfois en vinification.

De même, la corrélation négative est établie entre les concentrations du moût en acides aminés et la production de H_2S. Celle-ci est maximale pendant la phase de multiplication des levures (NOBLE, 2000). La concentration en glutathion (lui-même précurseur d'H_2S) est aussi corrélée positivement avec l'azote total et les acides aminés.

La complexité des mécanismes de régulation de ces métabolismes levuriens, sous la dépendance de nombreux gènes en cours d'identification (SPIROPOULOS, 2000), ne permet pas encore de prévoir efficacement le risque de formation excessive d'H_2S.

Toutefois, l'addition d'azote assimilable au bon moment, l'absence de SO_2 et de débourbage sont des facteurs positifs de réduction de ce risque. Dans le cadre de la vinification charentaise pour la production de vin de distillation Cognac, ces deux derniers points sont généralement réunis.

b) Composés azotés

- Urée et carbamate d'éthyle

Le carbamate d'éthyle (ou uréthane, NH_2-CO=O-C_2H_5) et ses précurseurs (urée, arginine, citrulline) ont été identifiés dans les vins (OUGH, 1991). Le caractère cancérigène de certains carbamates impose de rechercher à minimiser leur présence dans les produits de la vigne (jus, vins, eaux-de-vie).

TABLEAU I
Effets de l'addition de méthionine et d'ammonium sur la production de H_2S par la levure 522D en milieu synthétique (d'après SPIROPOULOS, 2000)

Effect of methionine and ammonium supply on H_2S production by yeast 522 D on synthetic medium

N équivalent	Méthionine (μM)	Ammonium (μM)	H_2S (μg)
433	100	15	71
	342	15	45
	584	15	24
208	100	8	180
	520	8	77
123	100	1.5	157

L'urée est formée pendant la fermentation à partir de l'arginine par réaction enzymatique. La levure utilise l'urée comme source d'azote en cas de déficience du milieu, par hydrolyse en ammonium et CO_2 (figure 4). Dans les moûts riches en azote assimilable (> 1000 mg/l), certaines souches de levures productrices d'urée excrètent celle-ci dans le milieu. Des corrélations positives ont été trouvées entre le niveau de fertilisation azotée du vignoble et la teneur en urée du vin (SPAYD, 1994) et en arginine (BERTRAND, 1991).

À partir de 1 g/l d'arginine dans le moût, il y aurait un potentiel de production de carbamate supérieur à la teneur acceptable. L'addition tardive de phosphate diammonique (après 75 p. cent de sucre dégradé) dans le moût en fermentation pourrait conduire à une pro-

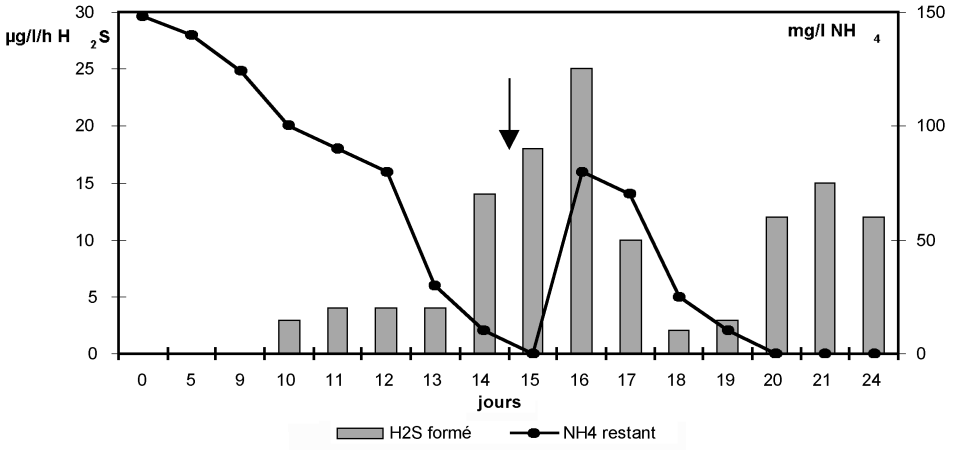


Figure 2 - Effet de l'addition de NH_4 sur la production de H_2S par la levure AWRI 72 sur milieu synthétique (d'après HENSCHKE, 1991)

Effect of ammonium supply on H2S production by yeast AWRI on synthetic medium

J. Int. Sci. Vigne Vin, 2002, **36**, n°1, 1-10
©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

duction double de carbamate d'éthyle avec certaine levures. L'arginine ne serait à l'origine que de 45 p. cent maximum du carbamate d'éthyle du vin. D'autres précurseurs ont été proposés : citrulline, ornithine (OUGH, 1991), acides aminés N-carbamylés pour le vin, et acide cyanhydrique (HARA, 1988), isocyanates pour les eaux-de-vie. Les conditions de conservation des vins et des eaux-de-vie (température élevée, lumière) peuvent participer à l'augmentation de la teneur en carbamate.

Les bactéries de la fermentation malolactique pourraient aussi avoir un rôle, suivant les conditions de milieu et les souches, mais cette hypothèse serait controversée (MIRA DE ORDUNA, 2000).

Il existe des différences de potentiel de production du carbamate d'éthyle selon les souches de levures qui seront donc à utiliser judicieusement dans les situations à risques (moûts riches en N assimilable ou en arginine > 1 g/l).

Le carbamate d'éthyle pourrait aussi se former au cours de la distillation du whisky en présence de cuivre, mais seule une faible partie passerait dans le cœur du distillat, la majeure partie restant dans les secondes et les vinasses (RIFFKIN, 1989).

Un taux relativement élevé en carbamate d'éthyle peut être trouvé dans certaines eaux-de-vie de fruits à noyau (3 000 μg/l à 12 000 μg/l) ; il a été mis en relation avec la présence de cyanoglucosides (LEBLOND, 1992) pouvant libérer de l'acide cyanhydrique. La teneur de ce dernier peut être réduite grâce à l'action des sels de cuivre et la double distillation (coulage > 65 p. cent d'éthanol). Ce point a été confirmé pour les eaux-de-vie de vin obtenues par double distillation (LURTON, 1992) : il apparaît que le carbamate d'éthyle peut se former, mais qu'il reste majoritairement dans les flegmes.

Un guide de « bonnes pratiques » pour prévenir le risque d'apparition du carbamate d'éthyle dans les vins a été diffusé par l'Université de Davis, U.S.A. (http://vm.cfsan.fda.gov/~frf/ecaction.html).

- Autres composés

Différents composés, liés variablement à la teneur en azote des moûts, peuvent être à l'origine d'odeurs désagréables dans les vins et les eaux-de-vie, ou sont indésirables :

- Les caroténoïdes peuvent générer le trop répandu « TDN » (1,1,6-triméthyldihydro-naphtalène) à odeur d'hydrocarbure (CANTAGREL, 1990 ; SPONHOLZ, 1991).

- L'odeur de « souris », fréquente dans certains vins blancs, est attribuée à deux isomères du 2-acétyltetrahydropyridine, dont l'origine est corrélée au méta-

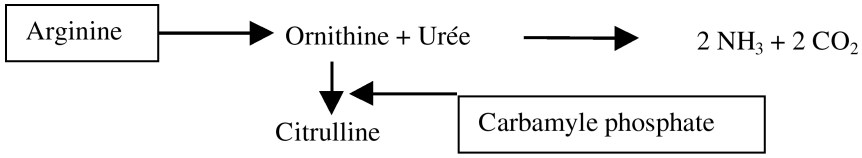


Figure 3 - métabolisme de l'arginine dans *S. cerevisiae* (d'après OUGH, 1988)

Arginine metabolism in *S. cerevisiae*

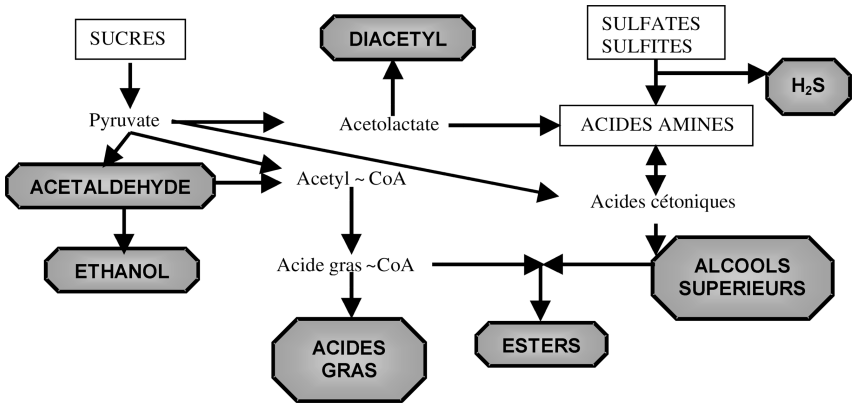


Figure 4 - Origine des composés volatils dans la levure (d'après HENSCHKE, 1993)

Origin of main volatile sulphur compounds in yeast

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

bolisme de la lysine en présence d'éthanol chez les *Lactobacilles* et certaines levures (*Brettanomyces*).

- La levure peut aussi former d'autres composés azotés, notamment le N-(2-phényléthyle)-acétamide et le N-(3-méthylbutyle)-acétamide (RAPP, 1995). La thiamine peut être à l'origine de vinylthiazoles que l'on retrouve dans les eaux-de-vie (STRAUSS, 1978), en quantité plus importante pour celles issues de vins sur lies.

- Les amines (histamine, tyramine, β-phényléthyle amine, putresceine, etc.) Ces derniers composés ont été reconnus comme présentant un danger potentiel pour la santé humaine. Leur teneur dans les vins est due à la dégradation de l'arginine et de l'ornithine par certaines bactéries lactiques, donc sous l'influence de la fermentation malolactique (SPONHOLZ, 1991).

c) Acidité volatile

Toute fermentation difficile peut conduire à l'augmentation de la teneur du vin en acidité volatile. L'ajout d'ammonium peut diviser par deux la teneur en acidité volatile (0,30 à 0,15 g/l H_2SO_4) du vin (RIBÉREAU GAYON, 1999) (voir aussi le tableau III).

2) Composés positifs

a) Acides, aldéhydes, alcools

De nombreux auteurs s'accordent sur la corrélation entre la quantité d'acides aminés dans le moût et les teneurs en alcools supérieurs. Plusieurs mécanismes chimiques ont été proposés (il existerait au moins trois voies) (figure 4).

Plus généralement, il est établi qu'une des principales sources d'aldéhydes et alcools supérieurs du vin est les acides aminés, issus de la dégradation par la voie d'Ehrlich ou provenant du catabolisme des sucres (VERSINI, 1991). La levure utilise le groupement NH_2 et excrète le squelette carboné. Les acides cétoniques sont excrétés ou décarboxylés en aldéhydes correspondants et réduits en alcools. Le tableau II présente cette famille de composés.

TABLEAU II
Produits volatils issus des acides aminés (d'après HENSCHKE, 1993)
Volatile products stemming from amino acids

désamination → décarboxylation → réduction

Acides aminés	Acides cétoniques	Aldéhydes	Alcools
Alanine	2-cétopropionique	Acétaldéhyde	Ethanol
Sérine	3-hydroxy 2-cétopropionique	Glyoxal	Glycol
A 2 amino-butyrique	2- cétobutyrique	Propionaldéhyde	1-propanol
-	-	Butyraldéhyde	1-butanol
Valine	2- céto isovalérique	Isobutyraldéhyde	2-méthyl 1-propanol
Isoleucine	2-céto 3-méthyl valérique	2-méthylbutyraldéhyde	2-méthyl 1-butanol
Leucine	2-céto iso caproïque	Isovaléraldéhyde	3-méthyl 1-butanol
		Hexanal	1-hexanol
Phénylalanine	3-phényl-2-céto-propionique	-	Alcool phényléthylique
Tyrosine	3-(4-hydroxyphényl) 2-cétopropionique		Tyrosol
Tryptophane	-	-	Tryptophol

TABLEAU III
Valeurs moyennes de production de composés volatils de 27 souches de levures à 16 °C (d'après VOS, 1993)
Mean values of volatile compounds produce by 27 yeast strains at 16 °C

	Moût carencé en N	Moût carencé + 211 mg/l NH_4	Moût normal
Temps de fermentation (j)	32	21,3	23,5
Sucre résiduel (g/l)	9,1	3,1	2,8
g CO_2/750 ml	15,8	24,9	27,5
Total esters (mg/l)	57	85	86
Total alcools supérieurs (mg/l)	220	176	226
Acide acétique (mg/l)	325	223	289
Qualité sensorielle (Σ rangs)	76	47	32

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

Un exemple quantitatif est donné dans le tableau III. L'addition d'azote dans un moût carencé induit une baisse des alcools supérieurs et une augmentation des esters.

Ces productions de composés volatils sont fortement influencées par la souche de levure et la température de fermentation. Les souches non pourvues d'activité sulfure réductase ne produisent pas d'H_2S.

Un exemple de comparaison entre deux souches, productrices ou non de SO_2, est donné dans le tableau IV. Les proportions respectives d'alcools supérieurs sont liées à ce caractère, notamment le n-propanol.

Ces résultats montrent l'interrelation entre la formation d'hydrogène sulfuré, le dioxyde de soufre et le n-propanol.

b) Acides gras et esters

Les acides gras à courte chaîne sont des co-produits de la fermentation alcoolique : acétique, propionique, butanoïque, lactique. La levure produit aussi des acides intermédiaires (C8 à C12) et à longue chaîne (C14 à C18), qui sont des constituants de sa membrane. A partir de ces acides, la fermentation forme des esters éthyliques ainsi que des acétates (odeurs fruitées) depuis les alcools supérieurs. La formation d'esters est corrélée positivement avec la teneur en azote du moût, ainsi que les acétates d'isoamyle et d'hexyle. Inversement, l'acétate de phényléthyle serait corrélé négativement à l'azote (HENSCHKE, 1993 ; RAPP, 1995). Le phényl-2-éthanol (odeur de rose) est corrélé négativement à la teneur en acides aminés du moût (VERSINI, 1991 ; NICOLINI, 1995).

Récemment, il a été confirmé que les moûts à fortes teneurs en acides aminés donnent des vins plus riches en esters, mais aussi en acides gras et plus pauvres en alcools supérieurs (GUITART, 1999). Cette même équipe a vérifié les relations entre les acides aminés des moûts et certains composés aromatiques du vin : il existe une forte corrélation entre les acides aminés (sauf alanine et arginine) et 9 produits volatils (acides gras linéaires et leurs esters, *cis* 3-hexénol et alcool benzylique), tandis qu'il y a une forte opposition avec le succinate de diéthyle et l'acide isobutyrique. Les autres corrélations positives sont faibles avec l'alcool isoamylique et le 2-hexanoate d'éthyle.

Plus en détail, il y a une forte corrélation entre les acides gras et leurs esters et l'acide γ-amino-butyrique, la sérine et la méthionine ou entre l'alcool benzylique et le *cis*-3-hexenol avec la glutamine, la glycine, l'isoleucine, la phényl alanine, la tyrosine et la valine (GUITART, 1999).

c) Composés carbonylés

L'acétaldéhyde (odeur de pomme verte) et le diacétyl (odeur beurrée) sont les principaux composés volatils carbonylés produits par la levure, avec l'acétoïne. Une carence azotée du moût provoque une baisse de la teneur en aldéhydes et une augmentation de celle en diacétyl.

d) Autres composés

Le niveau de fumure azotée du vignoble semble peu affecter les teneurs en composés terpéniques (WEBSTER, 1993). Les variations observées sont très liées aux millésimes. Le citronellol et l'oxyde 2 de linalol libres décroissent linéairement avec l'augmentation de la fumure ; les formes liées de ceux-ci augmentent avec la fumure, de même que l'α terpinéol, le géraniol et l'alcool benzylique.

La levure participe aussi à la production de composés volatils à partir de précurseurs du raisin : les phénols volatils (acide cinnamique, férulique, coumarique

TABLEAU IV

Influence de la concentration en azote sur la production d'alcools supérieurs par deux souches différentes sur milieu synthétique (d'après GIUIDICI, 1994)

Influence of nitrogen concentration upon fusel alcohol produced by two strains on synthetic medium

Souches	NH_4 (g/l)	SO_2 (mg/l)	H_2S : test acétate Pb	Propanol (mg/l)	Isobutanol (mg/l)	Alcool iso amylique (mg/l)	Alcool amylique (mg/l)
6527 (H_2S^+)	0.5	72	+	25	37	123	15
	1	108	+	30	35	126	13
	5	115	+	22	30	86	13
	10	72	-	27	25	89	11
6392 (H_2S^-)	0.5	51.8	-	69	30	113	21
	1	95.1	-	240	39	154	29
	5	64.8	-	243	46	145	28
	10	31.7	-	149	30	64	12

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

donnent des vinylphénols), et les lactones (à partir des acides oxo-glutarique et oxo-butyrique). Ces composés se retrouvent dans les eaux-de-vie, où ils donnent des odeurs d'épices, de bois, de tourbe, de sueur, d'urine, de pharmacie (phénols), ainsi que de noix de coco et de pêche (lactones).

D'autres composés azotés volatils ont été caractérisés pour leur contribution positive (odeur végétale, poivron vert) à l'arôme des vins : les méthoxypyrazines, notamment pour le Sauvignon (SPONHOLZ, 1991). La teneur du vin en 3-méthylthiopropane-1-ol est inversement corrélée à l'azote aminé libre (RAPP, 1991). Des dérivés de thiazole (4-méthyl-5-vinylthiazole, hydroxyéthylthiazole) provenant de la dégradation thermique de la thiamine ont été identifiés dans des distillats (STRAUSS, 1978).

III - EFFETS SENSORIELS

Ces effets sont plus difficiles à quantifier. Il est reconnu qu'une teneur excessive du vin ou des eaux-de-vie en alcools supérieurs est plutôt désagréable. Bien que la production de ces alcools soit sous la dépendance de plusieurs facteurs (souche, température, bourbes…), la richesse initiale du moût en acides aminés est fortement corrélée avec la teneur finale du vin en certains des alcools supérieurs.

Des corrélations ont pu être mises en évidence entre l'intensité aromatique des vins (SINTON, 1978), positives avec l'azote total des moûts, et négatives, avec le niveau de production. Cet effet positif a été attribué à l'augmentation des teneurs en esters, dont les acétates.

VOS (1981) confirme la forte corrélation de l'azote assimilable du moût avec la qualité du vin liée aux teneurs élevées en esters d'éthyle et d'acétates, et faibles en alcools supérieurs et en hexanol.

Ces résultats ont été confirmés récemment sur le Chardonnay (GUITART, 1999). Les vins riches en esters éthyliques (arôme fruité) sont obtenus à partir à partir des moûts les plus riches en acides aminés.

D'autres essais montrent que les dégustateurs constatent bien les différences entre les vins issus de vignes fertilisées différemment en azote (WEBSTER,

TABLEAU V
Essais de la fumure azotée et d'entretien du sol sur Thomson Seedless (d'après OUGH, 1989)
Nitrogen fertilisation and soil management effect on Thomson Seedless

Traitements		Arginine moûts (mg/l)	Intensité arôme Moyenne notes 1-10	Intensité flaveur Moyenne notes 1-10	Qualité générale Moyenne notes 1-20
Entretien sol	N kg/ha				
Enherbé	0	-	3,87	4,17	12,96
	112	965	3,89	3,48	12,44
Cultivé	0	-	3,61	4,31	13,09
	112	1401	4,22	4,13	12,93
Cultivé	224	1816	3,80	3,61	12,33
	448	1718	3,63	3,56	12,20

TABLEAU VI
Essais de fumure azoté et d'entretien du sol sur Chasselas (d'après MAIGRE)
Nitrogen fertilisation and soil management effect on Chasselas

Entretien sol	N kg/ha	NH_2 moûts (mg/l)	Phényl-2-éthanol	Σ Iso-pentanols	Σ rangs	Classement
Cultivé 1991	0	1	53	351	42	3ab
	100	1,55	34	266	27	1a
Enherbé 1991	0	0,49	58	250	54	4b
	100	0,76	61	302	27	1a
Cultivé 1992	0	1,37	40	268	27	2ac
	100	2,32	15	169	21	1ad
Enherbé 1992	0	0,68	75	339	38	3a
	100	1,27	62	344	54	4bcd
Non cultivé 1993	0	0,66	53	255	70	4b
	100	1,51	12	134	39	1a
Enherbé 1993	0	0,80	33	181	50	3ab
	100	1,19	12	135	41	2a

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

1993). Le tableau V présente l'un de ces résultats. Les meilleurs vins sont obtenus avec des fertilisations faibles à modérées (0 à 112 kg/ha de N).

Des travaux suisses (MAIGRE, 1995) montrent que les moûts correctement pourvus en azote donnent généralement les vins les plus appréciés. Un exemple est donné dans le tableau VI.

Ce qui est confirmé aussi en Bordelais sur du Merlot en vignoble enherbé (tableau VII).

CONCLUSION : L'AZOTE, JUSTE CE QU'IL FAUT POUR FERMENTER !

La composition azotée des moûts est à l'origine de la qualité des vins, en passant par les modifications induites et provoquées de la fermentation alcoolique : souche de levure, température, oxygénation, turbidité, additifs…

Il en résulte une grande variabilité de la constitution des vins et notamment de leurs composés odorants (tableau VIII). Pour les cépages peu aromatiques, les arômes fermentaires sont les principaux constituants volatils des vins et conditionnent en grande partie leur qualité organoleptique, ainsi que celle des eaux-de-vie qui en sont issues.

L'ensemble des travaux disponibles à ce jour montre qu'il est indispensable de rechercher une composition des moûts naturellement équilibrée en azote assimilable (140 à 1 000 mg/l) pour obtenir les meilleurs résultats. En effet, les moyens de correction accessibles aujourd'hui à l'œnologue sont limités qualitativement et quantitativement ! Cependant, une nouvelle possibilité est apparue récemment : il a été mis en évidence que les besoins en azote des souches de levures pouvaient être très différents (JULIEN, 2000), ce qui ouvre la porte à la sélection et l'utilisation de souches à faibles besoins azotés sur les moûts carencés.

TABLEAU VII
Essais de fumure azotée et d'entretien du sol sur Merlot (d'après LARCHEVÈQUE, 1998)
Nitrogen fertilisation and soil management effect on Merlot

Entretien du sol	Année	NH_2 moûts (mg/l)	Σ des rangs	Classement
Témoin N = 0	1995	575	62.5	5 c
	1996	2301	50	5 b
Enherbé N = 30	1995	1044	42	4 b
	1996	2615	39.5	3 b
Enherbé N = 60	1995	918	38.5	3 b
	1996	2641	44.5	4 b
Enherbé N = 90	1995	923	35	2 b
	1996	2878	39	2 b
Enherbé 2 x 45	1995	595	32	1 a
	1996	2164	37	1 b

TABLEAU VIII
Synthèse simplifiée des relations azote - qualité
Synthetic table of nitrogen – quality relationship

Composé	Sensibilité à l'azote du moût	Moûts carencés en azote	Moûts riches en azote	Effets sur le vin et les eaux-de-vie
Esters d'éthyle	+++	↘ ↘	↗ ↗	Arôme vineux, fruité
Acétates	+++	↘ ↘	↗ ↗	Arôme fruité
Phényl 2 éthanol	++	↗	↘	Arôme floral, rose
Terpènes	+	↘	↗	Arôme miel, tilleul
Alcools supérieurs	+++	↗	↘	Arôme lourd, herbacé
Propanol 1	+++	↘	↗ ↗	Arôme alcool, fruit mûr
Potassium	+	↘	↗	Diminue l'acidité et la stabilité
Acidité volatile	+++	↗ ↗ ↗	↘	Piqûre acétique
H_2S	+++	↗ ↗ ↗	↘ ↘	Arôme œuf pourri
R – SH	++	↗ ↗	↘ ↘	Arômes réduits, animal
Amines	++	↘	↗	Composés potentiellement dangereux pour la santé humaine
Urée, carbamate	++	↘	↗	

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

Les moûts carencés en azote, ou trop riches, seront à l'origine de problèmes fermentaires, de déviations aromatiques, voire même de composés potentiellement dangereux.

Le dosage de l'azote assimilable disponible dans le moût devrait donc s'imposer rapidement comme un contrôle routinier, au même titre que la richesse en sucres. Il sera un critère objectif pour apprécier le potentiel qualitatif du vignoble (pilotage de la fumure azotée et de l'entretien du sol) et un guide pour le vinificateur (choix de la levure, corrections du moût, gestion de la fermentation). Mais des indicateurs plus précoces seraient précieux et les recherches en cours devront établir si les corrélations entre l'azote des raisins ou des pétioles à la véraison avec celui du moût à la récolte seront exploitables dans la pratique.

Tout ceci dans la considération des exigences du consommateur : qualité du produit, sécurité sanitaire et respect de l'environnement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BERGER S., SCHOBER V., KORNTHEUER K. et FARDOSSI A., 1999. Einfluss des hefeverwertbaren stickstoffes auf die gärung in mosten der sorten Grüner Veltliner, Rheinreisling, Welschriesling und Neuburger. *Mitt. Klost.*, **49**, 117-123.

BERTRAND A., INGARGIOLA M.C. et DELAS J ., 1991. Effects of nitrogen fertilisation and grafting on the composition of must and wine from Merlot grapes, particularly on the presence of ethyl carbamate. *Int. Symp. on nitrogen in grapes and wine.* Am. Soc. Enol. Vitic., Davis, USA.

BIDAN P., 1975. Relation entre la teneur des vins en alcools supérieurs et la teneur des moûts en substances azotées, en particulier les acides aminés. *Bull. O.I.V.*, **536**, 841-867.

CANTAGREL R., SYMONDS P. et CARLES J., 1982. Composition en acides aminés du moût en fonction du cépage et de la technologie et son influence sur la qualité du vin. *Sci. Alim.*, **2**, n° hors série I, 109-142.

CORDONNIER R., 1966. Étude des protéines et des substances azotées. Rapport français. *Bull. O.I.V.*, **39**, 1475-1489.

DELFINI C., COCITO C. et BONINO M., 1999. Mécanismes biochimiques et moléculaires chez *Saccharomyces cerevisiae* impliqués dans la formation de quelques composés volatils dans les vins. Étude bibliographique. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **33**, 4, 195-211.

FERREIRA MONTEIRO F. et BISSON L.F., 1992. Nitrogen supplementation of grape juice. II. Effect on amino acid and urea release following fermentation. *Am. J. Enol. Vitic.*, **43**, 1, 11-17.

FEUILLAT M. 1998. Les composés azotés. *In : Œnologie, fondements scientifiques et technologiques.* Flanzy C. Ed., Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

GIUDICI P. et R.E. KUNKEE, 1994. The effect of nitrogen deficiency and sulfur-containing aminoacids on the reduction of sulfate to hydrogen sulfide by wine yeast. *Am. J. Enol. Vitic.*, **45**, 1, 107-112.

GUERLAIN J. et LEBLOND N., 1992. Formation du carbamate d'éthyle et élimination de l'acide cyanhydrique des eaux-de-vie de fruits à noyaux. *In : Elaboration et connaissance des spiritueux, recherche de la qualité, tradition et innovation*, R. Cantagrel, Ed. B.N.I.C., Tec & Doc, Lavoisier, Paris. 330-338.

GUITART A., ORTE HERNANDEZ P., FERREIRA V. PENA C. et CACHO J., 1999. Some observations about the correlation between the amino acid content of musts and wines of the Chardonnay variety and their fementation aromas. *Am. J. Enol. Vitic.*, **50**, 3, 253-258.

HARA S., YOSHIZAWA K. et NAKAMURA K., 1988. Formation of ethylcarbamate in the model alcoholic beverages containing urea or its related compounds. *J. Brew. Soc. Japan*, **83**, 1, 57-63.

HENSCHKE P.A. et JIRANEK V., 1993. Yeast metabolism of nitrogen compounds. *In : Wine microbiology and biotechnology*, Fleet G.H. Ed., Harwood Academic Publishers.

HENSCHKE P.A. et JIRANEK V., 1991. Hydrogen sulfide formation during fermentation : effect of nitrogen composition in model grape must. *Int. Symp. on nitrogen in grapes and wine. Am. Soc. Enol. Vitic.*, Davis, USA.

JULIEN A., ROUSTAN J-L, DULAU L. et SABLAYROLLES J-M, 2000. Comparison of nitrogen and oxygen demands of enological yeasts : technological consequences. *Am. J. Enol., Vitic.*, **51**, 3, 215-222.

LARCHEVÈQUE C., CASANOVA A., DUPUCH V. et RENARD R., 1998. Influence de la fumure azotée sur une vigne de *Vitis vinifera* L. var. Merlot avec enherbement permanent. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **32**, 1, 27-43.

LARCHEVÈQUE C., CASANOVA A. et DUPUCH V., 1998. Relation entre la fermentescibilité des moûts et la teneur en composés azotés. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **32**, 3, 137-151.

LARCHEVÈQUE C., CASANOVA A. et DUPUCH V., 1999. Influence de différents activateurs de la fermentation alcoolique sur la fermentescibilité des moûts de *Vitis vinifera* L. var. Muscadelle provenant de vignes enherbées. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **33**, 4, 161-175.

LÖHNERTZ O. et PRIOR B., 1996. Relationship between soil nitrogen supply and the formation of N-containing components in berries. *In Œnologie 95*, A. Lonvaud-Funel Ed., Tec & Doc, Lavoisier, Paris

LURTON L., VIDAL J.P., ESTREGUIL S. et CANTAGREL R., 1992. Comportement du carbamate d'éthyle

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)

lors de la distillation des vins pour l'obtention des eaux-de-vie de Cognac. *In : Élaboration et connaissance des spiritueux, recherche de la qualité, tradition et innovation*, R. Cantagrel, Ed. B.N.I.C., Tec & Doc, Lavoisier, Paris. 344-348.

MAIGRE D. et AERNY J., 2000. Essai d'enherbement et de fumure azotée sur Gamay dans le bassin lémanique, 2. Résultats analytiques et organoleptiques. *Rev. Suisse Vitic. Arbo. Horti.*, **32**, 5, 279-285.

MAIGRE D., AERNY J. et MURISIER F., 1995. Entretien des sols viticoles et qualité des vins de Chasselas : influence de l'enherbement permanent et de la fumure azotée. *Rev. Suisse Vitic. Arbo. Horti.*, **27**, 4, 237-251.

MAURICIO J.C., VALERO E., MILLAN C. et ORTEGA M., 2001. Changes in nitrogen compounds in must and wine during fermentation and biological ageing by flor yeasts. *J. Agric. Food. Chem.*, **49**, 3310-3315.

MIRA DE ORDUÑA R., LIU S.Q., PATCHETT M.L. et PILONE G.J., 2000. Ethyl carbamate precursor citrulline formation from arginine degradation by malolactic wine lactic acid bacteria. *FEMS Microbiology Letters*, **183**, 31-35.

NICOLINI G., VERSINI G., DALLA SERRA A., SEPPI A. et FALCETTI M., 1996. Peculiarities in the aroma compounds of Müller-Thurgau wines from different grape growing areas. *In : Œnologie 95*, A. Lonvaud-Funel Ed., TEC & DOC, Lavoisier, Paris.

OUGH C. S., 1991. Influence of nitrogen compounds in grapes on ethyl carbamate formation in wines. *Int. Symp. on nitrogen in grapes and wine.* Am. Soc. Enol. Vitic., Davis, USA.

OUGH C.S., CROWELL E.A. et MOONEY L.A., 1988. Formation of ethyl carbamate precusors during grape juice (Chardonnay) fermentation. *Am. J. Enol. Vitic.*, **39**, 3, 243-249.

OUGH C.S., STEVENS D. et ALMY J., 1989. Preliminary comments on effects of grape vineyard nitrogen fertilisation on the subsequent ethyl carbamate formation in wines. *Am. J. Enol. Vitic.*, **40**, 3, 219-220.

PARK S.K., BOULTON R. et NOBLE A.C., 2000. Formation of hydrogen sulfide and glutathione during fermentation of white grape must. *Am. J. Enol. Vitic.*, **51**, 2, 91-95.

RAPP A. et VERSINI G., 1991. Influence of nitrogen compounds in grapes on aroma compounds of wines. *Int. Symp. on nitrogen in grapes and wine.* Am. Soc. Enol. Vitic., Davis, USA.

RAPP A. etVERSINI G., 1995. Influence of nitrogen compounds in grapes on aroma compounds of wines. *In : Food flavors : génération, analysis and process influence*. G. Charalambous Ed. Elsevier Sciences. 1659-1694.

RIBÉREAU-GAYON P., 1999. Réflexion sur les causes et les conséquences des arrêts de la fermentation alcoolique en vinification. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **33**, 1, 39-48.

RIFFKIN H.L., WILSON R., HOWIE D. et MULLER S.B., 1989. Ethyl carbamate formation in the production of pot still whisky. *J. Inst. Brew.*, mars-avril, **95**, 115-119.

SINTON T.H., OUGH C.S., KISSLER J.J. et KASIMATIS A.N., 1978. Grape juice indicators for prediction on potential wine quality. *Am. J. Enol. Vitic.*, **29**, 267-271.

SOYER J.P., MOLOT C., BERTRAND A., GAZEAU O., LOVELLE B.R. et DELAS J., 1996. Influence de l'enherbement permanent sur l'alimentation azotée de la vigne et sur la composition des moûts et des vins. *In : Œnologie 95*, A. Lonvaud-Funel Ed., Tec & Doc, Lavoisier, Paris

SPAYD S.E., WAMPLE R.L., EVANS R.G., STEVENS R.G., SEYMOUR B.J. et NAGEL W. C., 1994. Nitrogen fertilisation of white Riesling grapes in Washington must and wine composition. *Am. J. Enol. Vitic.*, **45**, 1, 34-42.

SPIROPOULOS A., TANAKA J., FLERIANOS I. et BISSON L. F. 2000. Characterisation of hydrogene sulfide formation in commercial and natural wine isolate of *Saccharomyces*. *Am. J. Enol. Vitic.*, **51**, 3, 233-248.

SPONHOLZ W.R., 1991. Nitrogen compounds in grapes, must and wine. *Int. Symp. on nitrogen in grapes and wine*. Am. Soc. Enol. Vitic., Davis, USA.

STRAUSS C.R. et WILLIAMS J.P., 1978. The roles of thiamine and thiamine pyrophosphate as precursor of thiazole flavourants in grape spirits. *Chemistry and Industry*, **4**, 232-233.

VIDAL J.P., CANTAGREL R., MAZEROLLES G., LURTON L. et GASCHET J., 1990. Mise en évidence de l'influence du triméthyl-1,1,6 dihydronaphtalène sur la qualité organoleptique des eaux-de-vie de Cognac. *In : 1er Symp. Int. Œnol. : Les eaux-de-vie traditionnelles d'origine viticole*, Bordeaux, France. A. Bertrand Ed., Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

VOS P.J.A., 1993. Analyse de 27 souches de levures disponibles sur le marché avec références particulières à l'activité fermentaire, à l'azote assimilable, à la composition métabolique et à la qualité des vins. *10th Int. Œnol. Symp.*, 3-5 mai 1993, Montreux, Suisse.

WEBSTER R.D., EDWARDS C.G., SPAYD S.E., PETERSON J.C. et SEYMOUR B.J., 1993. Influence of vineyard nitrogen fertilisation on the concentration of monoterpenes, higher alcohols and esters in aged Riesling wines. *Am. J. Enol. Vitic.*, **44**, 3, 275-284.

Reçu le 30 octobre 2001
accepté pour publication le 20 janvier 2002

©Vigne et Vin Publications Internationales (Bordeaux, France)