

Désucrage des moûts de raisins par voie biologique en vue de corriger le degré alcoolique des vins

Biological de-sugaring of grape musts to adjust the alcoholic strength of wine

François Davaux¹, Elodie Gassiolle³, Magali Garcia³, Jean-Luc Favarel⁴, Kévin Sanguy⁴, Gema Nunez Lopez³, Clémence Thébaud³, Thomas Vuilmet³

¹ Institut Français de la Vigne et du Vin, 1920 route de Lisle sur Tarn, 81310 Peyrole (France)

² Plaimont Demain – 199, route de Corneillan, 32400 Saint-Mont (France)

³ AB7 Industrie - Chemin des Monges, BP9, 31450 Deyme (France)

⁴ Péra-Pellenc, 25 Avenue François Mïoch, 34510 Florensac (France)

Abstract. Climate change is having an ever-increasing impact on the physico-chemical composition of grapes, with ever-lower acidity and higher sugar levels. These high sugar levels are not without consequences for the alcoholic and malolactic fermentations, as well as for the physico-chemical and aromatic characteristics of the wines. Reducing the alcoholic strength is part of an approach aimed at meeting consumer expectations for more dietary, lighter or lower-alcohol wines (9 to 13% Vol.). This correction also helps rebalance the mouthfeel of wines by reducing the burning side of ethanol.

The technology presented here involves adding a fraction of the must previously desugared biologically to the must whose alcoholic strength is to be lowered.

Biological desugaring consists in using yeasts classically used in oenology in a fermenter under conditions of temperature, aeration, agitation and nitrogen nutrition defined to consume all the sugar in a minimum of time. *Sacharomyces cerevisiae* yeasts are crabtree positive, which means that whatever the aeration conditions, they will always produce alcohol. The ingenuity of the process consists in managing the yeast culture conditions to limit the crabtree effect, with total desugaring and a very low alcohol concentration production in less than 72 hours.

In all the trials, almost all the sugar in the must was consumed, and the alcohol content of the desugared must was around 1% Vol. During the desugaring phase, yeast metabolism leads to a sharp drop in pH, which must be regulated to avoid blocking yeast activity at too low a pH. In any case, acetic acid production remains limited.

Once the yeast-rich desugared must has been reincorporated into the initial tank, fermentation proceeds more rapidly as the alcoholic strength drops. On finished wines, organically desugared wines have a pH 0.1 to 0.3 pH units lower than the control, thus rebalancing acidity. Apart from a drop in alcoholic strength, no significant changes in physicochemical composition or aromatic compound content were observed in the organically desugared wines. Organoleptic analysis shows significant yeast notes in the dealcoholized wines, and the yeast load should be reduced by centrifugation or sedimentation before reincorporation of the desugared must. No objectionable change in organoleptic quality of organically desugared wines. Optimization of both the desugaring process and vinification is still necessary before this technology can be deployed on a large scale.

1. Introduction

Le changement climatique [1, 2] est une réalité qui se manifeste tous les ans un peu plus dans nos régions viticoles [3, 4] du sud et du sud-ouest de la France. Cela impacte la composition chimique [5] des raisins avec une diminution de l'acidité et de forte augmentation de la

teneur en sucres [6, 7] des raisins. Cette concentration en sucres élevée n'est pas sans conséquence sur le bon déroulement des fermentations alcooliques avec des départs en fermentation plus difficiles et souvent des fins de fermentation languissantes, voir dans les cas extrêmes des

blocages de fermentation [8]. Par ailleurs, les consommateurs recherchent des vins plus faciles à boire avec une teneur plus réduite en alcool. La correction de la teneur en alcool (-20% du degré alcoolique initial) s'inscrit dans une démarche visant à répondre aux attentes des consommateurs à la recherche de vins plus diététiques, allégés ou à plus faible teneur en alcool (9 à 13% Vol.). Cette correction permet également de rééquilibrer la bouche des vins en diminuant le côté brûlant apporté par l'éthanol [9].

Quelle que soit la technologie utilisée, la désalcoolisation a toujours un impact non négligeable sur la composante aromatique des vins qui conduit à une diminution plus ou moins importante des arômes du vin [10, 11, 12, 13, 14]. L'approche novatrice de cette étude, est de réduire la teneur en sucre du moût avant le départ en fermentation alcoolique afin de diminuer le degré alcoolique du vin. L'intérêt d'une technologie permettant de corriger le degré alcoolique potentiel avant le départ en fermentation permet de limiter les pertes aromatiques inhérentes à toutes les techniques de désalcoolisation sur vin.

La production des composés aromatique fermentaire comme les esters ou les arômes issus de précurseurs comme les thiols ne sont donc pas affecté par la désalcoolisation.

Ce procédé consiste à désucre totalement une fraction du moût de la cuve dont on veut diminuer le degré alcoolique et à le réincorporer dans cette même cuve après désufrage pour en faire baisser la teneur en sucres et par conséquent le degré alcoolique potentiel.

Ces travaux réalisés en condition pilote sur 30 litres et en condition industrielle (10 hl) sont mis en œuvre à partir de fermenteurs développés spécifiquement pour cette application.

2. Matériel et méthode

2.1. Principe du désufrage biologique

Le principe du désufrage consiste à ajouter au moût un petit volume de ce même moût préalablement désucre par voie biologique.

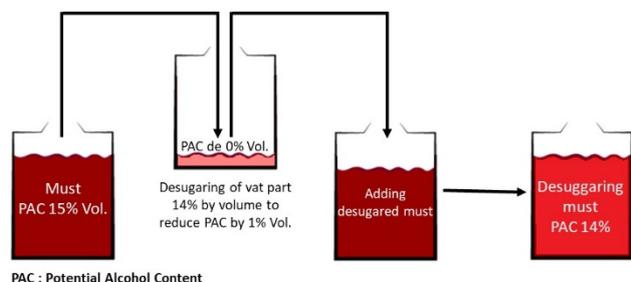


Figure 1. Schéma de principe du désufrage des moûts par voie biologique en vue de corriger le degré alcoolique des vins.

Pour cela le moût est placé dans un fermenteur de préférence de type « air lift » dans des conditions définies de température, pH, agitation et nutrition azotée. Les levures de type *Saccharomyces cerevisiae* sont mises en culture en milieu aérobie de façon à favoriser la multiplication cellulaire au détriment de la fermentation alcoolique (milieu anaérobie) de façon à consommer tout le sucre du moût en moins de 72 h. A l'issue de la consommation du sucre, le moût désucre est réincorporé au moût initial conduisant ainsi à la baisse de la teneur en sucres de la cuve finale. Pour diminuer de 1% Vol. potentiel d'une cuve de moût, il faut ajouter environ 14 % de volume de moût désucre. Il est important de prendre en compte l'effet « Crabtree positif » des levures *Saccharomyces cerevisiae* qui fait que même en milieu aérobie les levures produisent de l'éthanol en présence d'oxygène et de sucre. Il est important de prendre en compte cet effet afin d'obtenir un moût totalement désucre, avec une très faible concentration en alcool en un minimum de temps.

L'objectif de cette technologie est la correction de la teneur en alcool du vin fini entre -1 et -3 % Vol. environ par une technologie biologique. D'après les études préliminaires (non présentées ici), un désufrage plus poussé impacte négativement la qualité organoleptique du vin. L'ensemble des moûts utilisés dans cette étude sont issus de différents vignobles du Sud-Ouest de la France du millésime 2024.

2.2. Le fermenteur de désufrage biologique

Pour cette étude, deux fermenteurs sont mis en œuvre. Un premier de 15 litres pour les essais en petit volume permettant d'obtenir de 20 à 50 l de vin dont le Titre Alcoolique Potentiel (TAP) est diminué de 1 à 3% Vol. Le second est destiné aux essais industriels sur un volume d'environ 10 hl.

Fermenteur pilote (15 l) : Ce fermenteur de 15 l de volume utile est développé spécifiquement pour cette application. Il est réalisé en acier inoxydable et est équipé d'une double enveloppe permettant la régulation de la température du moût à désucre. La cuve est également équipée d'un condenseur pour limiter la perte de volume par évaporation (température élevée et apport d'air important). Le volume d'air apporté étant important, 3 frittés en céramique sont nécessaires. Une pompe de circulation permet d'améliorer l'homogénéité du moût dans le fermenteur. Ce fermenteur est équipé de différents capteurs avec des sondes de température, pH, oxygène dissous, de débitmètres d'air, d'un capteur de mousse, d'un réfractomètre Brix et d'un analyseur de gaz de fermentation permettant d'analyser en continu les productions et consommations d'O₂ et de CO₂. Un automate permet l'acquisition de tous ces paramètres et de réguler la température, le pH (bicarbonate de potassium) ainsi que l'ajout d'anti mousse. L'apport d'azote est réalisé manuellement à des stades définis du processus de désufrage (il n'existe pas de capteur d'azote assimilable).

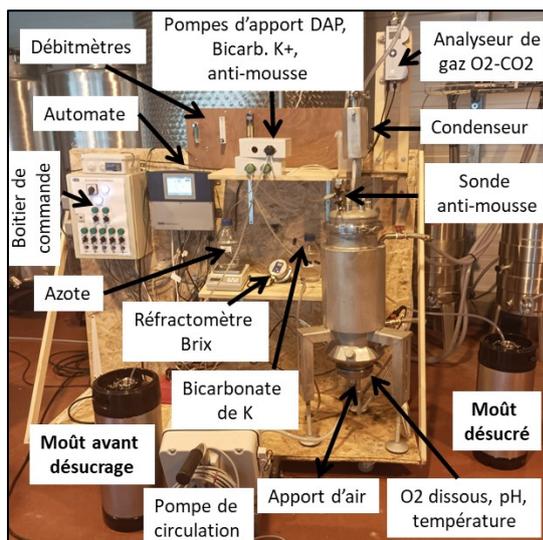


Figure 2. Fermenteur pilote (15 l) de désucrage des moûts.

Fermenteur industriel (220 l) : Ce fermenteur de 220 l de volume utile est de type « air lift » ce qui permet de simplifier sa fabrication, d'optimiser le transfert d'oxygène et d'avoir une bonne homogénéisation du milieu. L'air est apporté en fond de cuve par un tube en anneau perforé. Le chauffage de la cuve se fait au moyen de ceintures chauffante électrique. Ce fermenteur est également équipé d'un condenseur pour limiter les pertes de volume par évaporation au cours du process de désucrage. L'instrumentation de ce dernier se résume à une sonde de température et une sonde de pH. Le pH est géré automatiquement par l'automate qui apporte du bicarbonate de potassium à l'aide d'une pompe doseuse. La température est gérée uniquement en chauffage. De l'anti-mousse est ajouté régulièrement durant le cycle de désucrage.

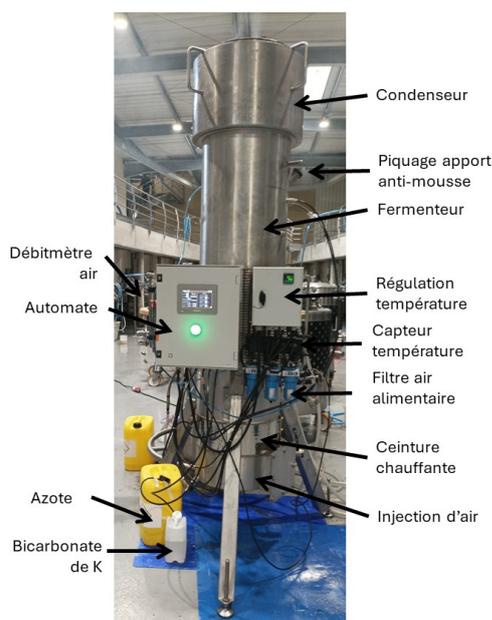


Figure 3. Fermenteur industriel (2,5 hll) de désucrage des moûts.

2.3. Conditions opératoires des fermenteurs

Les paramètres opérationnels nécessaires à la conduite des fermenteurs sont préalablement définis à partir d'études réalisées en laboratoire, à l'échelle de 2 l. Ces expérimentations ont permis d'identifier les facteurs déterminants pour le bon déroulement du procédé de culture en vue d'obtenir un désucrage complet avec une teneur en alcool maximale de 1% Vol. et avec une production très limitée en acide acétique, en moins de 72h. Une plage de pH optimale a ainsi été établie, de même qu'une concentration adéquate en inoculum de levures. Par ailleurs, le choix de la source d'azote, ainsi que les modalités d'ajout en termes de fréquence et de concentration ont également fait l'objet d'une optimisation.

Après remplissage du fermenteur avec le moût à désucrer, ce dernier est régulé en température pour une activité optimale des levures. Le levurage est réalisé avec une levure sèche active la B52NG (Herbslöh) à forte dose pour obtenir la vitesse de désucrage souhaitée. De l'air filtré de qualité alimentaire est apporté au fond de la cuve avec un débit définis et stable. Les apports d'azote (phosphate d'ammonium) sont réalisés manuellement à fréquence régulière grâce à un suivie hors ligne de l'azote assimilable. La régulation du pH est réalisée au pH du moût par du bicarbonate de potassium grâce à un automate.

2.4. Dispositif expérimental

Les 3 premiers essais sont réalisés en fermenteur pilote pour obtenir 30 L de vin. Le 4^{ème} essai est réalisé en condition industrielle pour obtenir 10 hl de vin avec une plus faible teneur en alcool.

Tableau 1. Description des 3 essais.

Essai	Cépage	Volume	Niveau de désucrage
1	Sauvignon	30 l	2
2	Colombard	30 l	2
3	Tannat rosé	30 l	2
4	Tannat	20 hl	1

Pour ces 4 essais, l'objectif est de diminuer de -2% Vol. les degrés alcoolique potentiel de ces vins. Les degrés potentiel des vins à désalcooliser sont compris entre 12,1 et 15,8% Vol., ce qui est conforme aux caractéristiques du millésime.

Pour les essais réalisés en petit volume, nous comparons le témoin non désucré à 2 modalités où a été ajouté respectivement 10% et 20% de moût désucré. Le Témoin est levuré avec la même levure que celle ayant servi au désucrage (B52 NG). Pour les modalités « désucré », aucun levurage n'est réalisé, les levures contenues dans la fraction désucré assure la fermentation alcoolique du moût. En fin de fermentation alcoolique, seul l'essai

réalisé sur vin rouge réalise sa fermentation malo-lactique. Les vins sont ensuite soutirés, stabilisé au niveau tartrique, filtré puis mis en bouteilles.

2.5. Méthodes analytiques

Durant le cycle de désucrage, un suivi analytique du désucrage est réalisé à la mise en place de l'essai puis toutes les 2h durant la journée. La nuit aucun prélèvement n'est réalisé. Durant le cycle de désucrage nous suivons les paramètres suivants : degré Brix, glucose/fructose, degré alcoolique, pH, azote aminé, azote ammoniacal, acide acétique et en biomasse. Le suivi de la fermentation alcoolique est réalisé de façon classique par mesure journalières de la densité et de la température. Un bilan analytique complet est réalisé sur le moût de départ, le moût désucré et le vin fini.

Le degré alcoolique est déterminé par un Alcoolyzer Wine M (Anton Paar), l'acidité totale (g/l H₂SO₄) et le pH par un Titalab AT1000 Series (Hach), les concentrations en acides organiques (acides malique, lactique, tartrique et acétique) sont déterminés par méthode enzymatique pour les deux premiers et colorimétrique pour l'acide tartrique à l'aide d'un analyseur séquentiel Gallery Plus (Thermo scientific). Les mesures de couleur, IC', coordonnées tristimulaires, l'IPT et les anthocyanes (méthode par décoloration au SO₂) sont réalisées sur un spectrophotomètre UV/Visible Nicolet évolution 100 (Thermo electron Corporation). La biomasse humide est déterminée par pesé après centrifugation et élimination du surnageant. La mesure de la densité et de la température de fermentation sont réalisées par un densimètre électronique DMATM 35 (Anton Paar). Les analyses des essais industriels sont réalisés sur un analyseur Infra Rouge a Transformé de Fourier (IRTF) FT-120 (Foss).

L'analyse des composés aromatiques sur vin fini tels que les esters, les norisoprénoides et les terpénols sont analysés par GC-MS-MS avec dilution isotopique par un laboratoire spécialisé.

L'analyse sensorielle est réalisée par un jury entraîné, composé d'une douzaine d'œnologues, ingénieurs et techniciens de l'IFV (Institut Français de la vigne et du Vin).

3. Résultats et discussion

3.1. Essais pilote

3.1.1. Le désucrage biologique du moût

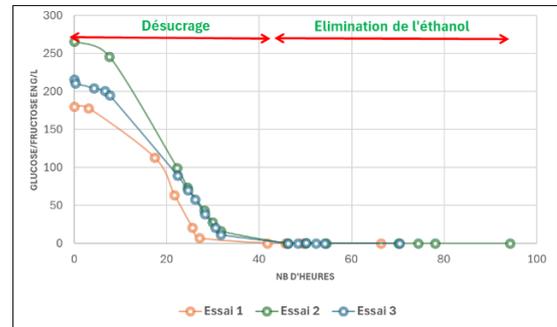


Figure 4. Cinétique de consommation du glucose et fructose (g/l) au cours du temps (heures) dans le fermenteur pilote de 15 l

Dans les conditions opératoires mises en œuvre, quel que soit la concentration en glucose/fructose initiale (entre 180 et 266 g/l) la cinétique de consommation des sucres par les levures suit la même tendance. La phase de latence est courte entre 7 et 8h ensuite l'activité des levures est maximale et la concentration en sucres diminue drastiquement. Pour ces trois essais le désucrage total est obtenue entre 41 et 46h après levurage. La forte population levurienne associée à un apport important d'air et d'azote précis expliquent ces résultats.

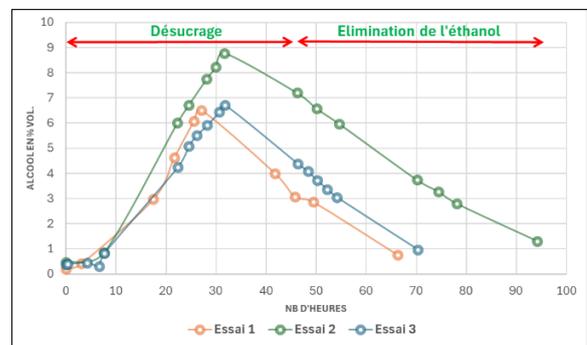


Figure 5. Cinétique de production / re consommation de l'éthanol au cours du cycle de désucrage

Les levures de type *Saccharomyces cerevisiae* mise en œuvre sont fortement Crabtree positive, cela implique que quel que soit les conditions opératoires elles produiront toujours de l'alcool. Le principe mis en œuvre dans ces essais consiste éliminer l'alcool produit après le désucrage total du moût. Post désucrage, l'élimination de l'alcool est réalisée en 39 à 63h en fonction du niveau d'alcool produit. La diminution de l'alcool débute avant la fin de la consommation des sucres. Les conditions de température et d'aération restent identique à la phase de désucrage. La cinétique d'élimination de l'éthanol est régulière jusqu'à la disparition quasi-total de l'alcool. Il reste environ 1% Vol. d'alcool dans le moût désucré à la fin de l'opération. Pour limiter la durée de cette étape, il est nécessaire de limiter au maximum la production d'éthanol.

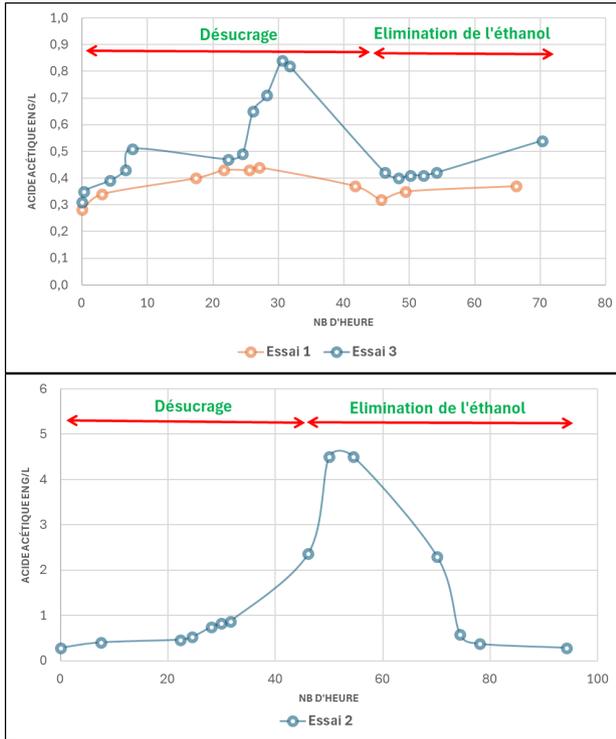


Figure 6. Cinétique de production de l'acide acétique au cours du cycle de désucrage

Sur les essais 1 et 3, on mesure une légère augmentation de l'acide acétique dans les moûts au cours du désucrage, suivie d'une légère diminution durant la phase d'élimination de l'alcool. Pour ces 2 essais, à la fin du cycle la concentration en acide acétique reste faible avec des teneurs respectivement de 0,37 et 0,54 g/l.

Pour l'essai 2, on observe une forte augmentation de la concentration en acide acétique durant le désucrage suivie d'une forte diminution lors de la phase d'élimination de l'éthanol pour finir à 0,28 g/l, ce qui est faible. Le seul facteur qui diffère par rapport aux 2 autres essais est une teneur en sucre initial beaucoup plus élevée avec 266 g/l. Le fort taux de sucres a pu modifier le métabolisme levurien.

Le suivi de la consommation d'azote (figure 7) en vue de sa gestion est un point important pour obtenir une vitesse maximale de consommation des sucres par les levures. Après 22h de désucrage dans 2 cas sur 3 on observe une carence en azote, mais cela ne semble pas impacter la cinétique de désucrage. Pour pallier cet inconvénient la programmation de l'automate a été modifiée pour réaliser un apport d'azote durant la nuit.

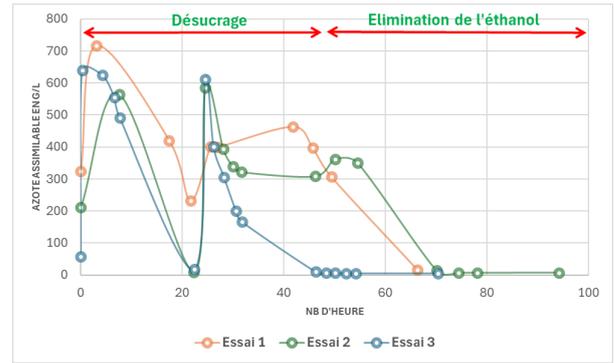


Figure 7. Cinétique de consommation de l'azote assimilable au cours du cycle de désucrage

A la fin de la consommation des sucres, le moût ne contient plus que quelques milligrammes d'azote assimilable par litre.

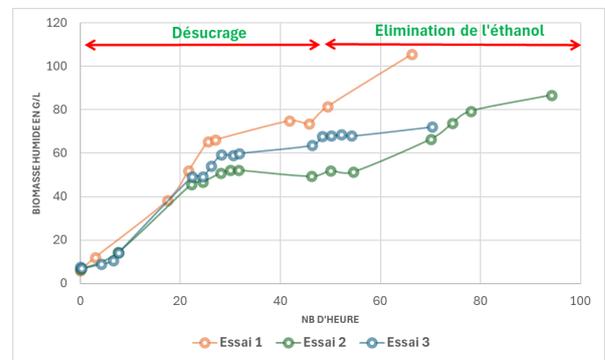


Figure 8. Cinétique de production de la biomasse levurienne durant le désucrage biologique

La cinétique de multiplication des levures est exponentielle durant la durée du cycle de désucrage y compris après la fin de consommation des sucres. La vitesse de croissance est maximale durant les 24 premières heures puis ralentie avant de se poursuivre plus lentement jusqu'à la fin du désucrage. Même en l'absence d'azote assimilable et de sucre, la biomasse augmente jusqu'à la fin du cycle. La multiplication cellulaire observée semble dépendre des sources carbonées et azotées qui pourraient provenir de l'autolyse des levures mortes, ainsi que de la reconsumation de certains métabolites.

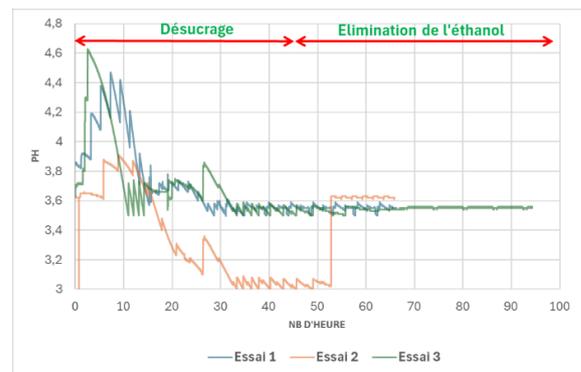


Figure 9. Régulation automatique du pH durant le cycle de désucrage biologique

En début de cycle l'ajout d'azote entraîne une augmentation du pH. Dès le début de la multiplication des levures, on mesure une diminution du pH par la libération d'ion H^+ dans le moût par les levures. Ce phénomène est bien connu lors de la préparation des levains pour la prise de mousse. Des essais préliminaires (non présenté ici) ont montré qu'en fonction du pH initial du moût, celui-ci pouvait descendre jusqu'à pH 2,5 et bloquer totalement l'activité des levures. Sur l'ensemble des essais, la régulation automatique du pH est correcte.

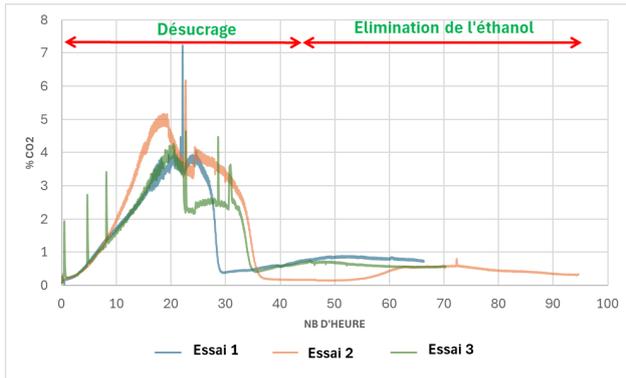


Figure 10. Evolution du CO₂ produit par la multiplication des levures durant le cycle de désucrage biologique

Le dégagement de CO₂ par les levures augmente rapidement dès l'introduction des LSA réhydratées avec un maximum atteint environ 20h après le début du désucrage. La diminution du dégagement de CO₂ après le pic semble liée à la carence en azote en fin de nuit. Après ajout d'azote le dégagement de CO₂ se maintient puis augmente légèrement. Ce manque d'azote semble perturber le métabolisme des levures et semble ralentir le cycle de désucrage. Il est indispensable de maintenir un apport régulier d'azote durant la nuit. Après le désucrage complet le dégagement de CO₂ chute presque à zéro puis réaugmente légèrement durant la phase d'élimination de l'alcool.

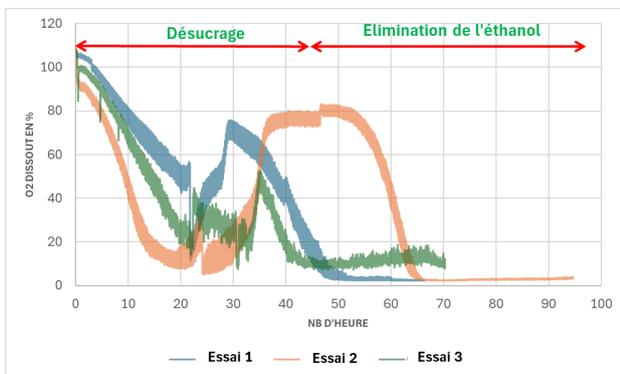


Figure 11. Evolution de l'oxygène dissout dans le moût au cours du cycle de désucrage biologique

A la mise en place des essais, les moûts sont saturés en O₂ dissout. Au fur et à mesure de la multiplication des

levures et de la consommation du sucre, la concentration en oxygène dissout baisse fortement. Au fur et à mesure du ralentissement de l'activité levurienne (épuisement en sucre du milieu). La teneur en oxygène dissout du moût réaugmente avant de rediminuer de nouveau lors de la phase d'élimination de l'alcool. Durant cette étape, la concentration en oxygène dissout est au plus bas et le reste jusqu'à la fin de l'essai. Sur l'essai 2, l'augmentation de la teneur en oxygène dissout post désucrage coïncide avec la forte augmentation de la teneur en acide acétique. Dès que la teneur en oxygène dissout diminue, la concentration en acide acétique diminue également.

Tableau 2. Caractéristiques analytiques des moûts après désucrage.

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Degré alcoolique [% Vol.]	0,6	1,4	1
Degré potentiel [% Vol.]	0,3	0,8	0,6
Glucose/Fructose [g/l]	4,6	0,1	5,0
Acidité Totale [g/l H2SO4]	6,3	4,4	4,2
pH	3,62	3,55	3,56
Acide Tartrique [g/l]	4,8	3,6	2,8
Acide Malique [g/l]	0,2	0,2	0,9
Acide acétique [g/l]	0,74	0,50	0,91
Azote alpha-aminé [mg/l]	22	10	5
Azote ammoniacal [mg/l]	1	0	1
Azote assimilable [mg/l]	22	10	5

A la fin du cycle de désucrage, le moût contient au maximum 1,4% vol. d'alcool. Il faut noter, que même dans un moût classique, il y a toujours une petite quantité d'alcool (environ 0,5% Vol.). Pour chacun des 3 lots la teneur en sucres est de 5 g/l maximum. Les teneurs en acides organiques sont classiques, et seule la teneur en acide acétique est un peu plus élevée que les valeurs mesurées lors du suivi du désucrage. En fin de désucrage, les teneurs en azote assimilable sont très faibles. Lors de l'assemblage avec le moût initial, il faudra veiller à ce que le moût ne se retrouve pas en situation de carence azotée.

3.1.2. La fermentation alcoolique

À la suite du désucrage, une décantation est réalisée pour éliminer la majorité des levures restantes. Ce moût désucré, est ensuite assemblé à raison de 10% et 20% en volume au même moût non désucré de façon à obtenir des vins avec un degré alcoolique moindre après la fermentation alcoolique. Un levurage classique avec de la LSA B52NG est réalisé sur le témoin sans ajout de moût désucré. Pour les deux modalités ayant reçues un apport de moût désucré c'est la biomasse levurienne restantes contenue dans le moût désucré qui assure la fermentation alcoolique.

Tableau 3. Caractéristiques analytiques des moûts avant fermentation alcoolique et après assemblage avec la fraction désucré.

	Essai 1			Essai 2			Essai 3		
	Témoin	+10% de moût désucré	+20% de moût désucré	Témoin	+10% de moût désucré	+20% de moût désucré	Témoin	+10% de moût désucré	+20% de moût désucré
Degré potentiel [% Vol]	12,3	11,1	9,9	13,6	12,4	11,2	12,2	11,0	9,8
Diminution du TAP/Témoin	-1,5	-3,3		-1,4	-3,2		-1,7	-3,3	
Glucose/Fructose [g/l]	224,2	198,7	168,0	246,1	221,8	192,4	213,7	185,2	157,6
Acidité Totale [g/l H2SO4]	7,1	7,2	7,1	6,3	6,1	5,9	6,6	6,4	6,4
pH	3,05	3,05	3,04	3,04	3,06	3,07	3,07	3,12	3,18
Acide Tartrique [g/l]	3,9	4,1	4,2	3,1	3,4	3,4	4,3	4,2	4,0
Acide Malique [g/l]	7,7	6,9	6,1	7,0	6,4	5,7	5,7	5,2	4,7
Acide acétique [g/l]	0,29	0,35	0,42	0,30	0,32	0,34	0,32	0,41	0,47
Azote alpha-aminé [mg/l]	154	143	139	73	67	61	40	45	38
Azote ammoniacal [mg/l]	201	187	169	50	45	40	18	142	136
Azote assimilable [mg/l]	355	329	308	123	112	101	58	187	174

Les caractéristiques analytiques des témoins correspondent aux moûts non désucrés. Après assemblage du moût avec la fraction désucriée, on mesure une baisse du degré alcoolique potentiel entre -1,2 et -2,4 % Vol. par rapport au témoin pour des apports respectif de 10 et 20% de moût désucrié. L'acidité des moûts diminue légèrement. La gestion du pH de désucriage peut permettre d'ajuster le pH du moût avant départ en fermentation. On mesure une légère augmentation des différents acides organiques, l'évaporation du moût durant le désucriage entraîne certainement une concentration de ces acides.

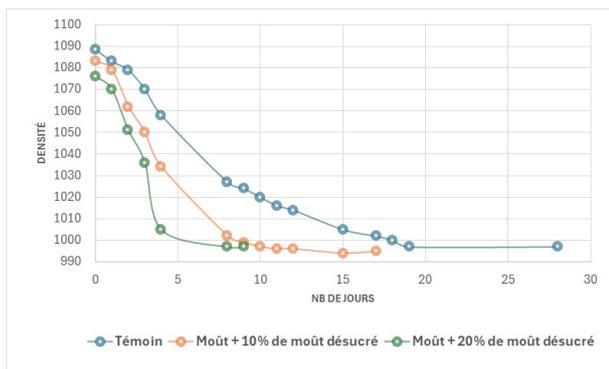


Figure 11. Cinétique fermentaire de l'essai 2. Comparaison du Témoin à deux niveaux d'ajout de moût désucrié

En début de fermentation, on observe distinctement les différences de densité entre les trois moûts. Plus on apporte de moût désucrié au moût initial et plus la densité de départ est faible du fait de la dilution par le moût désucrié. Plus la densité initiale est faible et plus la cinétique fermentaire est rapide. Cette rapidité est due à deux facteurs, la concentration en sucres et la charge levurienne initiale certainement plus élevée contenue dans le moût désucrié.

3.1.3. Vin fini

Tableau 4. Caractéristiques analytiques des vins finis

	Essai 1			Essai 2			Essai 3		
	Témoin	+10% de moût désucrié	+20% de moût désucrié	Témoin	+10% de moût désucrié	+20% de moût désucrié	Témoin	+10% de moût désucrié	+20% de moût désucrié
Degré alcoolique [% Vol]	12,2	11,8	10,6	12,5	12,7	11,5	12,0	11,5	10,0
Glucose/Fructose [g/l]	6,2	0,3	0,1	22,7	5,4	0,4	1,8	0,1	0,1
Baisse du TAV en % Vol. théorique		-0,8	2,0		-0,8	-2,3		-0,6	-2,0
Acidité Totale [g/l H2SO4]	7,2	7,8	7,4	6,1	5,8	5,6	6,1	5,8	6,0
pH	2,99	2,86	2,80	3,07	3,03	2,95	3,05	3,06	3,07
SO2 Libre [mg/l]	9	17	15	11	7	16	13	8	3
SO2 Total [mg/l]	45	78	68	71	45	82	71	49	36
Acide Tartrique [g/l]	2,7	2,9	3,0	2,6	2,3	1,4	2,4	1,8	1,7
Acide Malique [g/l]	5,7	5,3	4,7	5,1	5,0	4,1	3,9	3,3	3,3
Acide acétique [g/l]	0,88	0,83	0,83	0,73	0,72	0,69	0,62	0,47	0,51
Acide Lactique [g/l]	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
IPT	7,3	5,9	6,6	8,2	8,6	7,2	18,0	16,2	16,7
Anthocyanes [mg/l]							93	106	98
DO 420	0,10	0,15	0,22	0,12	0,19	0,20	6,25	6,48	8,05
DO 520	0,04	0,06	0,10	0,03	0,07	0,10	11,27	12,86	14,87
DO 620	0,01	0,03	0,06	0,01	0,04	0,06	1,04	0,92	1,37
IC'	0,2	0,2	0,4	0,2	0,3	0,4	18,6	20,3	24,3
Nuance	2,61	2,37	2,24	3,68	2,57	2,11	0,55	0,50	0,54
L	97,57	95,53	92,61	97,81	94,84	92,99	98,01	96,63	92,55
a	-0,81	-2,05	-2,54	-2,40	-2,23	-2,07	66,68	70,10	69,74
b	6,66	8,73	12,09	8,60	10,83	10,61	7,52	8,77	15,82
c	6,70	8,96	12,36	8,93	11,06	10,81	67,10	70,65	71,51
h	96,93	103,22	101,88	105,62	101,65	101,04	6,43	7,13	12,78

Sur vin fini, des sucres résiduels sont mesurés sur l'ensemble des Témoins et plus particulièrement sur l'essai 2. Sur ces vins la fermentation alcoolique s'arrête avant la consommation totale du sucre. Pour chacun des deux niveaux de désalcoolisation, la baisse du degré alcoolique est inférieure de 30% à 40% par rapport à ce qui

est mesuré avant le départ de la fermentation alcoolique. Deux hypothèses soit le mélange moût + moût désucrié n'était pas homogène, soit les levures ont un rendement en éthanol plus élevé que ce qui est prévu. L'acidité des vins issus des moûts désucrés sont légèrement plus faible que les témoins. Les concentrations en acides organiques sont légèrement plus faibles sur les lots désalcoolisés. Les caractéristiques polyphénoliques (IPT, anthocyanes et couleur) des vins désalcoolisés montrent une augmentation de leur concentration vraisemblablement liée à la concentration plus élevée de ces composés dans le moût désucrié

Tableau 5. Composés aromatiques sur vin de Tannat rosé.

	Essai pilote		
	Témoin	+10% de moût désucrié	+20% de moût désucrié
2-phényléthanol - (µg/L)	20934	48179	45979
acétate d'hexyle - (µg/L)	447	97	53
acétate d'isoamyle - (µg/L)	2585	1325	729
acétate de 2-phényléthyle - (µg/L)	281	185	103
SUM OF ACETATES (µg/l)	24246	49787	46864
décanoate d'éthyle - (µg/L)	465	311	190
hexanoate d'éthyle - (µg/L)	821	698	463
octanoate d'éthyle - (µg/L)	1065	643	372
butanoate d'éthyle - (µg/L)	303	216	194
SUM OF LINEAL ETHYL ESTERS (µg/l)	2654	1869	1219
2-hydroxypropanoate d'éthyle - (µg/L)	2188	2015	2120
3-hydroxybutanoate d'éthyle - (µg/L)	109	202	191
2-méthylbutanoate d'éthyle - (µg/L)	nd	nd	nd
2-méthylpropanoate d'éthyle - (µg/L)	23	40	79
2-hydroxysuccinate d'éthyle - (µg/L)	nd	10	12
SUM OF BRANCHED ETHYL ESTERS (µg/l)	2320	2267	2402
1,1,6-triméthyl-1,2-dihydronaphthalène - (µg/L)	0,11	0,05	0,04
b-damascénone - (µg/L)	7,6	6,0	5,2
b-ionone - (µg/L)	0,07	0,07	0,06
SUM OF C13 - NORISOPRENOÏDES (µg/l)	7,75	6,08	5,31
2-isobutyl-3-méthoxyxypazine	nd	nd	nd
Terpénols			
linalol - (µg/L)	13	18	16
géraniol - (µg/L)	9	16	16
citronellol - (µg/L)	3	7	9
alpha-terpineol - (µg/L)	3	2	3
SUM OF TERPENOLS (µg/l)	27,1	43,4	43,9

La synthèse de molécules aromatiques par les levures semble partiellement influencée par le désucriage biologique. La concentration en 2-phényléthanol est deux fois plus élevée sur les vins issus du désucriage biologique alors que pour les autres acétates, on mesure une légère diminution. Les esters et norisoprénoides, montrent une diminution plus ou moins importante de leur concentration sur les lots désucrés. La teneur en terpènes est plus élevée sur les lots désalcoolisés.

3.2. Essais industriels 10 hl

3.2.1. Le désucriage biologique du moût

Tableau 6. Caractéristiques analytiques des moûts

	Témoin	Essai
Sucres [g/l]	229	226
Degré potentiel [% Vol]	13,6	13,5
Acidité Totale [g/l H2SO4]	4,66	4,73
pH	3,24	3,22
Acide Tartrique [g/l]	4,61	4,76
Acide Malique [g/l]	4,35	4,4
Azote ammoniacal [mg/l]	9	8
Azote alpha-aminé [mg/l]	41	43
Azote assimilable [mg/l]	50	52
Glycérol [g/l]	0,7	0,6

La composition analytique des moûts de départ est conforme aux caractéristiques du millésime. Pour un Tannat, les degrés potentiels sont un peu faibles, l'acidité

est normale et la teneur en azote assimilable correspond au niveau de carence important. Il conviendra de corriger sa teneur avant le départ de la fermentation alcoolique.

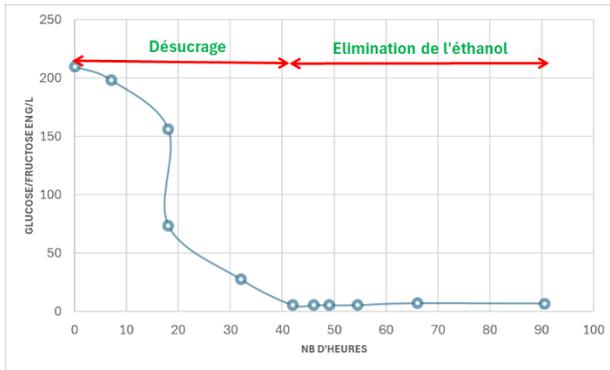


Figure 12. Cinétique de consommation du glucose et fructose du moût dans le fermenteur industriel de 210 l.

L'organisation de cet essai industriel, est plus délicates à mettre en œuvre que les essais pilotes. Cependant, le mode opératoire est identique à quelques détails près. En raison d'une production de mousse excessive, nous avons réduit drastiquement l'apport d'air durant les 18 premières heures puis réaugmenté jusqu'à la fin du cycle de désucrage biologique. La phase de latence (7h environ) est similaire aux essais réalisés au stade pilote et le désucrage complet est obtenu en 42h soit une durée similaire aux essais réalisés en petit volume.

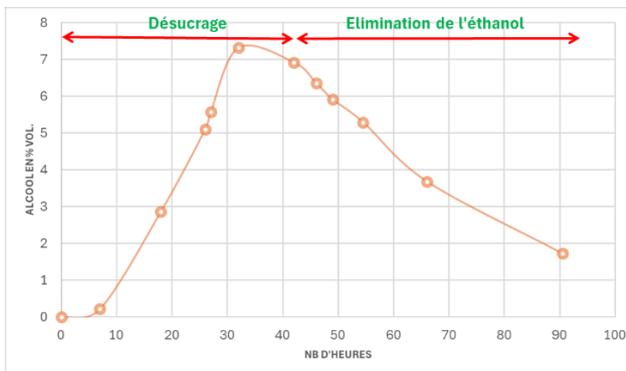


Figure 13. Cinétique de production / re consommation de l'éthanol au cours du cycle de désucrage en conditions industrielles.

Le levurage est réalisé avec la même souche de levures B52NG (Erbsloeh) et la même dose que les essais pilote. Le désucrage complet du moût est obtenu en 42h soit une durée comparable aux essais pilote avec une teneur en sucres résiduels inférieure à 10 g/l. L'élimination de l'alcool est réalisée en 48h après la phase de désucrage. Les conditions de température sont constantes durant tout le process. A la fin du process, il reste 1,7 % Vol. d'alcool dans le moût désucré soit une diminution de 5,6 % Vol. du moût désucré.

Sur cet essai industriel, la production d'acidité volatil (figure 14) est plus importante que pour les essais pilote avec une teneur maximale à 1,95 g/l. L'acide acétique est ensuite vraisemblablement évaporé durant la phase

d'élimination de l'éthanol (température élevée et forte aération).

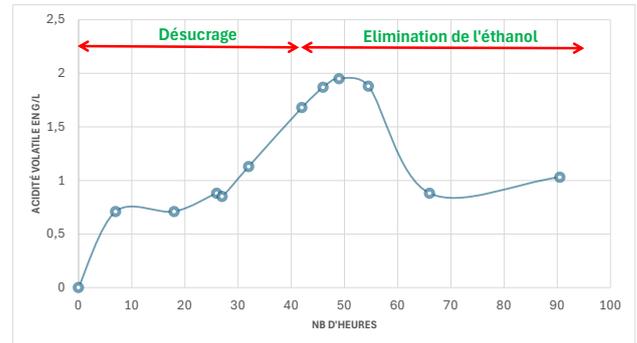


Figure 14. Cinétique de production de l'acide acétique au cours du cycle de désucrage en conditions industrielles

A la fin de l'essai le moût désucré contient environ 1 g/l d'acidité volatile. Ce moût étant ensuite assemblé avec le moût de départ pour faire baisser le degré alcoolique potentiel, l'apport d'acide acétique dans le moût reste faible (environ 0,2 g/l) sachant que l'acide acétique est consommé par les levures en début de fermentation cela n'a pas d'incidence sur la qualité du futur vin.

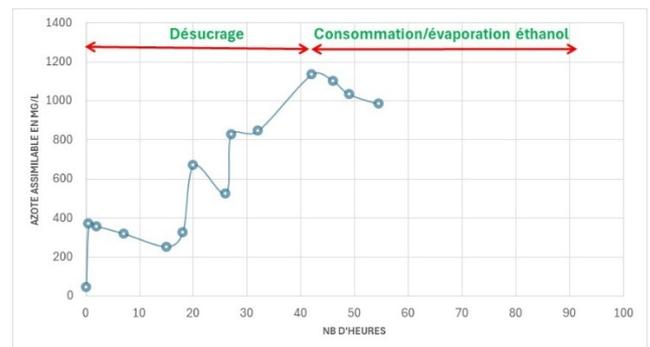


Figure 15. Cinétique de consommation de l'azote assimilable au cours du cycle de désucrage en conditions industrielles

Avec 44 mg/l, le moût initial est fortement carencé en azote assimilable. Avant le départ en fermentation, le moût est complété en azote minéral (phosphate di ammonium) et en azote organique (écorce de levures). Durant les 18 premières heures, les compléments d'azote ont permis de réguler sa teneur à des valeurs proches de 300 mg/l, par la suite les apports d'azote sont supérieurs à la consommation par les levures pour atteindre plus de 1 100 mg/l en fin de désucrage. A partir de 42h, la teneur en azote commence à baisser, mais le suivi n'a pas été poursuivi jusqu'à la fin de l'essai.

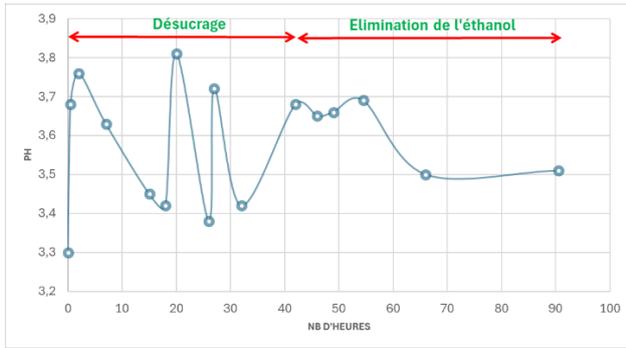


Figure 16. Régulation automatique du pH durant le cycle de désucrage biologique en conditions industrielles

En début de cycle, l'ajout de DAP entraîne une forte augmentation du pH.

Comme pour les essais pilote, en début de multiplication des levures on mesure une forte diminution du pH qui est régulée par des apports de bicarbonate de potassium (pics à 20h et 28h). Ce suivi ne permet pas de visualiser la régulation automatique du pH car le fermenteur n'est pas équipé d'un système d'enregistrement du pH. On voit simplement le pH à travers des mesures ponctuelles, mais globalement la régulation du pH est respectée.

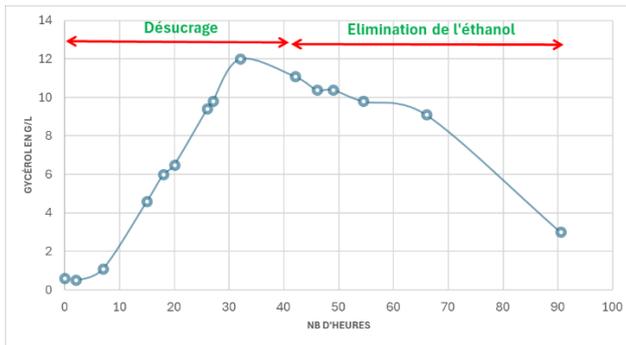


Figure 17. Cinétique de production de glycérol par les levures au cours du cycle de désucrage en conditions industrielles

La cinétique de production du glycérol suit celle de la production de l'éthanol jusqu'à la fin du désucrage. Lors de la phase d'élimination de l'alcool, la concentration en glycérol diminue. A la fin du cycle, le moût désucré contient 3 g/l de glycérol avant départ en fermentation.

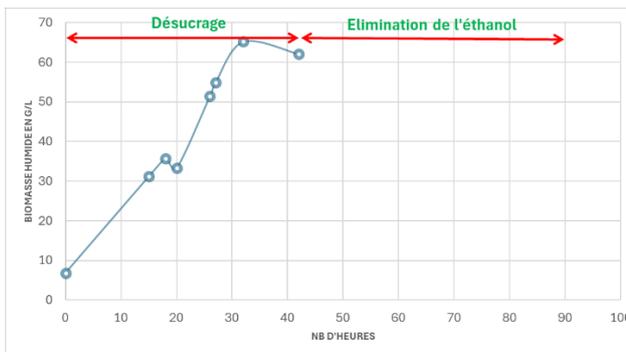


Figure 18. Cinétique de production de la biomasse levurienne durant le désucrage biologique en conditions industrielles

La cinétique de multiplication des levures augmente de façon linéaire durant la phase de désucrage pour atteindre un maximum de 65 g/l de biomasse humide. Le suivi de la biomasse n'a pas été poursuivi jusqu'à la fin de l'essai.

Tableau 6. Caractéristiques analytiques du moût après désucrage en conditions industrielles.

Moût désucré	
Glucose/Fructose [g/l]	7,1
Degré alcoolique [% Vol]	1,7
Acidité Totale [g/l H2SO4]	6,2
pH	3,51
Acide Malique [g/l]	7,09
Acidité volatil [g/l]	1,03
Glycérol [g/l]	3,0

Après désucrage, le moût contient 1,7% vol. et 7,1 g/l de sucre soit une consommation de 96,6% des sucres du moût de départ. La régulation de pH a parfaitement fonctionné, et le pH du moût désucré correspond à la valeur de consigne de la régulation.

La teneur en acide malique est assez élevée, peut-être due à une concentration par évaporation partielle du moût. L'acidité volatile est un peu élevée avec 1,03 g/l mais étant donné que ce moût est utilisé pour « diluer » le moût dont on veut faire baisser le degré alcoolique cela n'a pas d'incidence qualitative.

A la fin du désucrage, nous avons obtenus 200,5 l de moût désucré soit une perte en volume de 5% par évaporation, cela prouve la bonne efficacité du condenseur. L'intégralité du moût désucré est ajoutée dans la cuve de Tannat dont on veut diminuer le degré alcoolique. Ce vin dont on veut diminuer le degré alcoolique final est vinifié de façon traditionnelle dans une cuve de 10hl dans les mêmes conditions que le Témoin.

3.2.2. La fermentation alcoolique

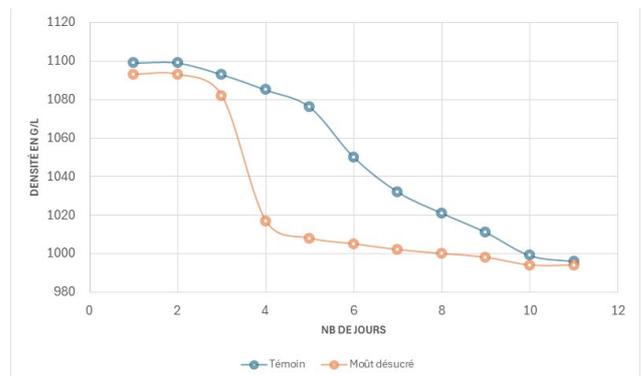


Figure 19. Cinétiques fermentaires de l'essai de désucrage biologique en conditions industrielle

La modalité « désucré » par voie biologique montre une cinétique fermentaire rapide en début de fermentation suivie d'une fin de fermentation plus lente jusqu'à épuisement complet des sucres. Pour finir, les deux

modalités achèvent leurs fermentations alcooliques simultanément. Cette cinétique fermentaire rapide s'explique par la forte charge levurienne. La clarification du moût désucré par sédimentation (24h à 16°C) n'a pas permis de diminuer suffisamment la population de levures pour obtenir une vitesse de fermentation classique. Ce point est à travailler pour assurer la production d'un vin de qualité.

3.2.3. Vin fini

La modalité « désalcoolisée » par ajout de 20% de moût désucré présente un degrés alcoolique inférieur au Témoin de -1,24 % Vol. ce qui correspond à une baisse du degré alcoolique de - 9,1% par rapport au Témoin.

La présence de 1,7% Vol. d'alcool et de 7,1g/l de sucre explique en partie le niveau de désalcoolisation deux fois plus faible que prévu. Le rendement de transformation des sucres en alcool plus élevé que prévu peut également expliquer ce résultat.

Tableau 7. Caractéristiques analytiques des vins finis essais en conditions industrielles.

	Témoin	+20% de moût désucré
Degré alcoolique [% Vol]	13,61	12,37
Baisse du TAV en % Vol.		1,24
Acidité Totale [g/l H ₂ SO ₄]	4,71	5,17
Acide acétique [g/l]	0,12	0,16
pH	3,72	3,65
Sucres réducteurs [g/l]	2,7	3,25
Glucose/Fructose [g/l]	0,4	0,5
Acide Malique [g/l]	2,97	3,23
Acide Lactique [g/l]	0,74	0,55
IPT	79	70

Le vin issu du désucrage biologique a une acidité totale plus élevée et un pH plus faible que le Témoin qui peut s'expliquer par le pH plus faible du moût désucré.

La fermentation alcoolique particulièrement rapide de la modalité « désucré » limite l'extraction des polyphénols d'où un IPT plus faible que pour le Témoin.

Tableau 8. Composés aromatiques sur un vin de Tannat – Essai réalisé en conditions industrielles.

	Essai industriel	
	Témoin	+20% de moût désucré
2-phényléthanol - (µg/L)	65273	55548
acétate d'hexyle - (µg/L)	32	36
acétate d'isoamyle - (µg/L)	729	826
acétate de 2-phényléthyle - (µg/L)	133	129
SUM OF ACETATES (µg/l)	66168	56538
décanoate d'éthyle - (µg/L)	135	121
hexanoate d'éthyle - (µg/L)	249	222
octanoate d'éthyle - (µg/L)	280	294
butanoate d'éthyle - (µg/L)	117	153
SUM OF LINEAL ETHYL ESTERS (µg/l)	782	791
2-hydroxypropanoate d'éthyle - (µg/L)	46535	38732
3-hydroxybutanoate d'éthyle - (µg/L)	295	435
2-méthylbutanoate d'éthyle - (µg/L)	nd	nd
2-méthylpropanoate d'éthyle - (µg/L)	20	46
2-hydroxyisocaproate d'éthyle - (µg/L)	44	43
SUM OF BRANCHED ETHYL ESTERS (µg/l)	46893	39256
C13 - Nonsopénoïdes		
1,1,6-triméthyl-1,2-dihydronaphthalène - (µg/L)	0,15	0,19
b-damascénone - (µg/L)	3,3	3,1
b-ionone - (µg/L)	0,21	0,18
SUM OF C13 - NORISOPÉNOÏDES (µg/l)	3,61	3,43
2-isobutyl-3-méthoxy-pyrazine	nd	nd
Terpénols		
Linatol - (µg/L)	18	16
Géranol - (µg/L)	17	8
Citronellol - (µg/L)	12	8
alpha terpineol - (µg/L)	3	3
SUM OF TERPENOLS (µg/l)	50,6	34,9

En conditions industrielles le désucrage biologique des moûts semble moins impactant sur la concentration en composés aromatiques qu'en condition pilote. Dans tous les cas, la teneur en molécules aromatiques du vin désalcoolisé est plus faible que le Témoin, cependant cette baisse reste limitée, ce qui est encourageant.

Tableau 10. Tests triangulaires entre un Témoin et vin désalcoolisé à différents stades de leur élaboration.

	Nb de dégustateur	Bonnes réponses	Mauvaise réponse	Significativité à 5%
Témoin/ Désalcoolisé	16	10	6	Significatif

Les vins sont dégustés début décembre par un jury de dégustation composé d'œnologues et de techniciens. Une différence significative est perçue entre le Témoin et la modalité désucré avec une préférence pour le Témoin. La modalité « désalcoolisé » par voie biologique est perçue plus fluide en bouche et moins aromatique. Ce qui différencie principalement le vin désalcoolisé et une note de levures particulièrement marquée. Cette note de levure a tendance à s'estomper dans le temps et cette dernière est perçue nettement moins présente lors d'une dégustation informelle réalisé courant Mars 2025.

4. Conclusion

Cette étude montre l'intérêt du désucrage biologique des moûts pour une correction limitée du degré alcoolique des vins mais montre également les limites de cette technologie. La partie désucrage du moût est encore à optimiser afin de limiter l'effet Crabtree. Une solution serait de désucrer totalement un pied de cuve puis d'apporter du moût frais à un débit équivalent à la vitesse de consommation par les levures du sucre apporté.

L'objectif est que la teneur en sucre dans le fermenteur reste toujours à une valeur proche de zéro g/l.

La gestion fine de l'azote assimilable est à prendre en compte afin d'éviter tout apport excessif. La gestion du pH par l'automate est bonne et pourrait également être mise à profit pour acidifier les moûts avant départ en fermentation en cas de nécessité.

A la fin du désucrage, il convient d'améliorer fortement l'élimination des levures du moût désucré pour éviter les notes de levures perçues sur l'essai industriel. Une centrifugation post désucrage permettrait de régler ce problème et devrait ralentir la vitesse de fermentation lors de la réintroduction dans la cuve de départ.

Des progrès dans la compréhension de l'effet Crabtree de *Saccharomyces cerevisiae* sont nécessaires afin d'optimiser le désucrage biologique des moûts. Un autre point important est l'amélioration de l'automatisation du process et plus particulièrement la gestion de l'azote pour limiter au maximum la durée du cycle de désucrage en évitant toute carence ou tout excès.

En condition industrielles les résultats organoleptiques sont encourageants une fois le problème de goût de levures résolu. Les modifications organoleptiques observées ne sont pas rédhibitoires.

Cette technologie semble prometteuse mais n'est pas encore tout à fait mature. Des travaux complémentaires sont nécessaires afin d'optimiser le process et la qualité des vins désalcoolisés élaborés.

5. Références

1. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.) IPCC: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press (2022)
2. N. Ollat, J.M. Touzard, Impacts and adaptation to climate change: new challenges for the French wine industry, *J. Int. Sci. Vigne Vin*, N° Special Laccave, 75-78 (2014)
3. G.V. Jones, Climate change and wine: Observations, impacts and future implications. *Wine Industry Journal*, 21, 4, 21-36 (2006)
4. J.P. Goutouly, Impacts du changement climatique sur la vigne et le raisin, *Rev. Fr. Œnologie*, 235, 23-26 (2009)
5. G. Barbeau, Influence du fonctionnement de la vigne sur la qualité du vin. VI Forum mondial del vino, Logrono, Espagne (2008).
6. P. Cottreau, D. Solanet, P. Vuchot, E. Ferment, P. Noilet, Réduction de la teneur en sucre des moûts, 20^{ème} Congrès international de la vigne et du vin, Logrono, Espagne (2006)
7. G.V. Jones et al. Climate change and global wine quality. *Climatic Change*, 73(3), 319-343. (2005)
8. R. Mira de Orduña. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43(7), 1844-1855. (2010)
9. C. Vaan Leeuwen, P. Darriet. The impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal of Wine Economics*, 11(1), 150-167.
10. U. Fischer et al. Impact of dealcoholization on sensory properties and volatile composition of wine. *Food Chemistry*, 139(1-4), 230-239. (2013)
11. G.J. Pickering. Low- and reduced-alcohol wine: a review. *Journal of Wine Research*, 11(2), 129-144. (2000)
12. A. Saha et al. Influence of dealcoholization techniques on wine quality: A critical review. *Food Research International*, 152, 110913 (2022)
13. P.A. Smith, R. Marchal. The chemistry and biological effects of the dealcoholization of wine. *Wine Chemistry and Biochemistry*, 231-252. (2013)
14. M. Moutounet. Prétraitement des raisins par flashage sous vide. Influence sur la qualité du vin | Prétraitement des raisins par flash-détente sous vide. Incidence sur la qualité des vins. *Bull. OIV*, 73 (827-828), 5-19 (2000)
15. Organisation internationale de la vigne et du vin, Code international des pratiques œnologiques (2022)