

OPTIMISATION DE LA CUVERIE ET DES DÉPENSES FRIGORIFIQUES GRÂCE À UN SIMULATEUR DE LA FERMENTATION ALCOOLIQUE

J.M. SABLAYROLLES

UMR 1083 SCIENCES POUR L'ŒNOLOGIE, INRA, 34060 MONTPELLIER
EMAIL : SABLAYRO@SUPAGRO.INRA.FR

Au niveau d'une cave, l'amélioration de la gestion de la cuverie et la baisse des dépenses frigorifiques peuvent représenter des enjeux majeurs. Si des progrès importants ont déjà été réalisés, des améliorations sont encore possibles, notamment en ce qui concerne les fermentations alcooliques. Une perspective intéressante consiste à développer des outils de prédiction de ces fermentations afin de mieux raisonner-anticiper leur déroulement et donc leur gestion. Une première étape en ce sens consiste à simuler cette fermentation et ainsi estimer son déroulement, à partir de données sur la composition initiale du moût. C'est précisément ce qui est présenté, avec l'élaboration :

- d'un modèle de la fermentation alcoolique suffisamment précis pour estimer l'évolution de la vitesse instantanée de fermentation, qui est directement proportionnelle à la production de chaleur. A noter que pour traduire cette information en terme de besoins en énergie frigorifique nécessaire pour la régulation de température, il faut en outre utiliser un modèle thermique estimant les pertes thermiques (1)
- d'un logiciel, basé sur ce modèle et prenant en compte non seulement une cuve de fermentation mais aussi l'ensemble d'une cuverie.

1. Modélisation de la fermentation alcoolique

Le modèle élaboré (2) prend en compte les principaux mécanismes physiologiques qui limitent la capacité fermentaire des levures. Comme indiqué sur la figure 1, il intègre :

- l'entrée des composés dans la cellule, principalement le transport des sucres et celui des composés azotés (acides aminés et sels d'ammonium),
- le rôle inhibiteur de l'éthanol,
- l'impact de la température, y compris lorsque celle-ci évolue en cours de fermentation

Le modèle a été testé sur une centaine de moûts synthétiques et naturels, principalement à l'échelle laboratoire (1 litre) mais aussi aux échelles pilote (100 litres) et industrielle (10 000 litres) et ce dans des conditions

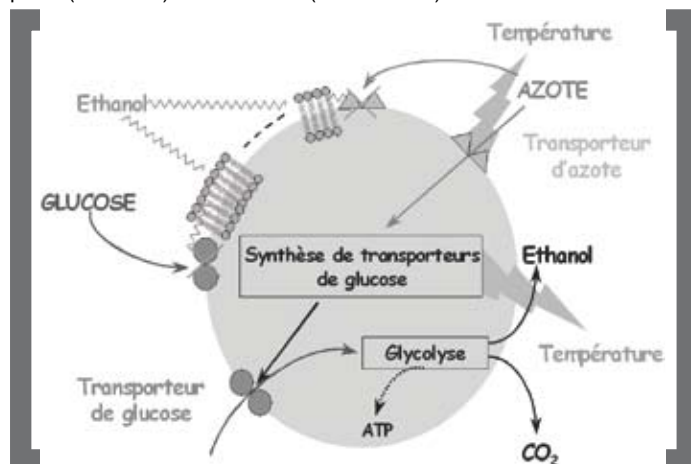


Figure 1 : Modélisation de la fermentation alcoolique

très différentes : quantités d'azote assimilable de 70 à 570 mg/l, ajouts d'azote (figure 2) suivant différentes modalités, conditions isothermes (18 à 30°C) ou non-isothermes (18 à 28°C) (figure 3). A l'exception de quelques moûts particuliers (principalement ceux conduisant à des arrêts de fermentation), le logiciel permet de décrire la cinétique au cours de la fermentation avec une bonne précision et de prévoir la durée de fermentation avec une erreur moyenne d'environ 10% (3).

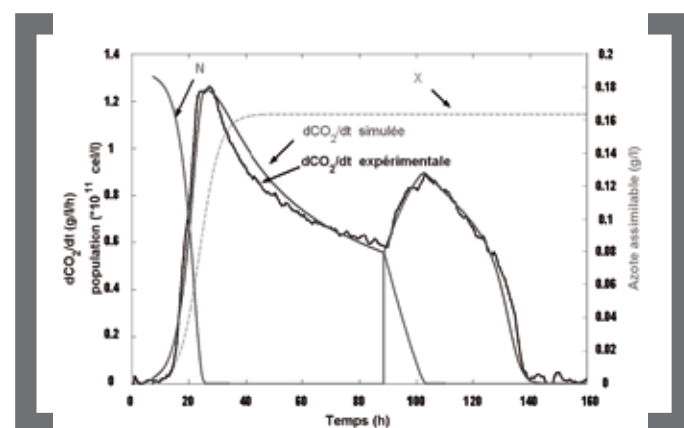


Figure 2 : Validation du modèle : estimation de l'évolution de la vitesse de fermentation. Cas d'un ajout d'azote (300 mg/l de diammonium phosphate).

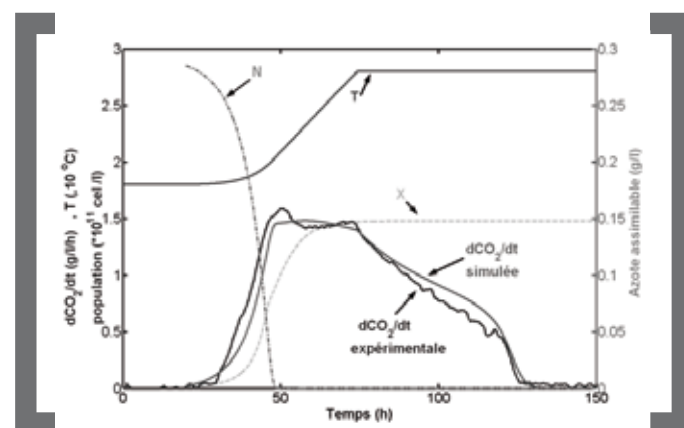


Figure 3 : Validation du modèle : Validation du modèle. Conditions non isothermes.

2. Logiciel de simulation

Un logiciel basé sur ce modèle a été développé. Il permet de simuler la cinétique fermentaire à partir des données suivantes : teneur initiale du moût en sucre et en azote assimilable, régime de température, ajouts de nutriments (azote ammoniacal). A noter l'importance de la concentration en azote assimilable qui est essentielle pour estimer la vitesse de fermentation (notamment la vitesse maximale).

Ce simulateur prend en compte l'ensemble d'une cave (possibilité de plusieurs dizaines de cuves). Il peut donc permettre d'estimer (a) les durées d'occupation de toutes les cuves (visualisées par des barres sur la figure 4) mais aussi (b) la quantité de frigories nécessaire pour réguler la température dans chacune des cuves et donc, par addition, sur l'ensemble de la cuverie (courbe en haut de l'écran sur la figure 4).

Au delà de cette fonction de simulation, cet outil possède un module d'aide à la décision pour rationaliser la gestion de la cuverie et des ressources frigorifiques. Pour cela, et en utilisant des approches relevant de la logique floue, il propose des solutions, dans lesquelles il modifie le moment de lancement de la fermentation, le régime de température et l'ajout de nutriments.

Ce logiciel est donc un outil pédagogique et d'aide à la décision. A noter cependant qu'il n'est pas utilisable pour estimer les risques d'arrêt de fermentation, dont le déterminisme est complexe et quasi-impossible à formaliser dans le cadre d'un modèle.



Figure 4 : Simulateur. Exemple de simulation, à l'échelle d'une cave.

3. Exemples

Voici quelques exemples illustrant l'intérêt du simulateur pour quantifier l'impact d'opérations technologiques.

Exemple 1 : Quelles conséquences d'une augmentation de température en cours de fermentation ?

Il s'agit de quantifier l'impact d'une pratique relativement courante consistant, en conditions de vinification en blanc, à laisser augmenter la température en fin de fermentation. Si l'on compare d'une part un régime isotherme à 16°C et d'autre part, un régime thermique avec une température initiale à 16°C et une augmentation de température - pendant la deuxième partie de la fermentation - jusqu'à 22°C, le simulateur calcule que l'augmentation de température raccourcit la fermentation de 27% et diminue les besoins en frigories de 36% (figure 5).

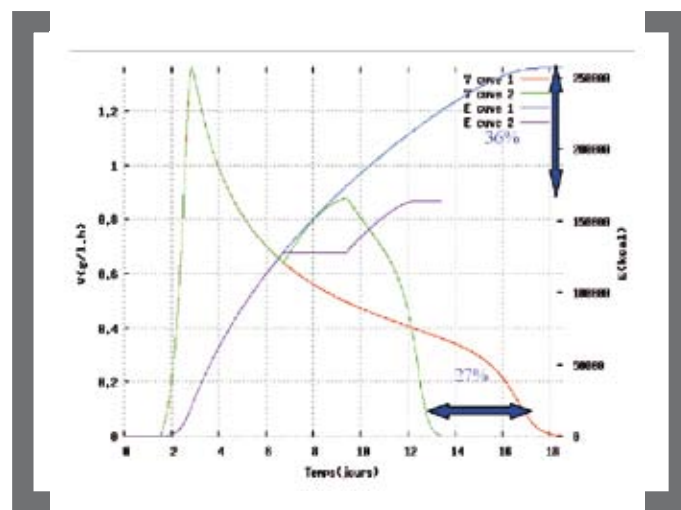
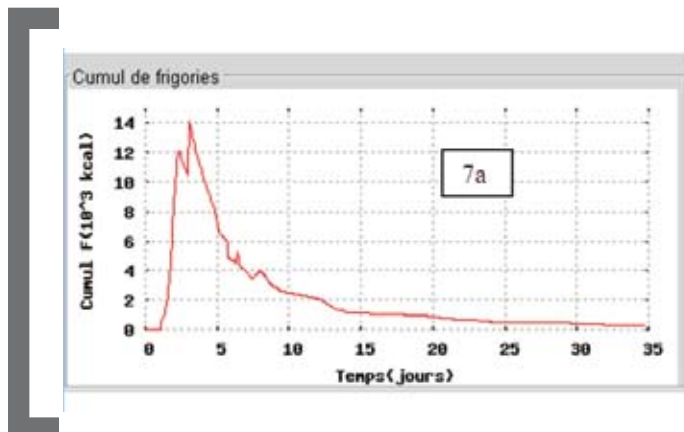


Figure 5 : Effet du régime de température

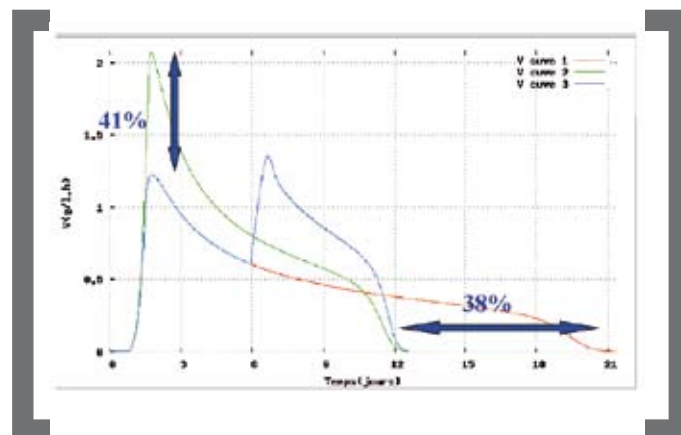


Figure 6 : Effet d'un ajout d'azote assimilable

L'estimation de l'économie en dépenses énergétiques est à moduler en fonction de la température extérieure et du volume de la cuve mais cette estimation constitue un très bon ordre de grandeur.

Exemple 2 : Quelles conséquences d'un ajout d'azote ammoniacal ?

Si l'on rajoute 400 mg/l de di-ammonium phosphate dans un mout contenant initialement 100 mg/l d'azote assimilable, l'augmentation de vitesse de fermentation (et donc de la puissance frigorifique nécessaire pour réguler la température de fermentation) est estimée à 41% et la diminution de la durée de fermentation à 38% (figure 6). Ce résultat illustre clairement le très fort impact d'un ajout d'azote.

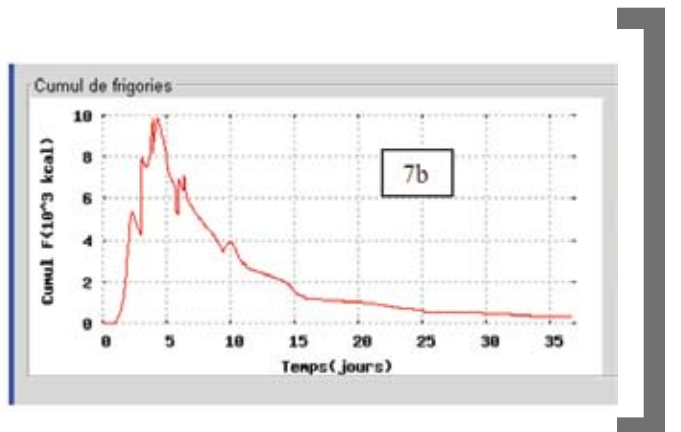


Figure 7 : Module d'aide à la décision. Intérêt d'un décalage des lancements de fermentation. 7a : lancements simultanés, 7b : décalage (de 24 ou 48 h) de certaines cuves pour abaisser la demande maximale en frigories.

Exemple3 : A l'échelle d'une cave, quel intérêt d'un décalage des lancements de fermentation ?

Les dates de lancement de fermentation sont souvent imposés mais, lorsque c'est possible, il peut y avoir un fort intérêt à échelonner ces lancements. Sur l'exemple choisi (figure 7), le module d'aide à la décision du simulateur propose certains lancements différés (jusqu'à 48 h) de telle sorte que la demande cumulée maximale en énergie frigorifique (qui doit être inférieure à la puissance du groupe frigorifique) devient inférieure de 31% à celle estimée dans le cas où toutes les fermentations démarreraient en même temps.

4. Perspectives

Après avoir utilisé le modèle pour faire de la simulation et de l'aide à la décision, il est possible d'envisager son utilisation pour un contrôle prédictif et optimisé. Dans ce cas, les interventions sur chacune des cuves (choix du régime thermique, ajouts de nutriments) seraient ajustées cuve par cuve en tenant compte à la fois de l'état d'avancement de la réaction et des prévisions du modèle. Pour que ce contrôle soit fonctionnel, il faudrait le coupler avec un suivi en ligne de la fermentation (mesure du débit de CO₂, par exemple). Ceci permettrait en outre (a) d'une part d'affiner au cours du temps les prévisions du modèle à l'aide des mesures expérimentales et (b) d'autre part de supprimer les dosages d'azote assimilable dans les moûts (estimation à partir de la vitesse de fermentation).

Une autre perspective concerne la prise en compte dans la modélisation non seulement de la réaction principale (sucre-alcool-CO₂) mais aussi d'autres voies métaboliques conduisant à des 'molécules-marqueurs' de la qualité du produit. Il s'agit là d'une approche long terme mais qui a d'ores et déjà démarré et devrait donner lieu à des premiers résultats exploitables dans les prochaines années.

Remerciements

Ce travail a donné lieu à de nombreuses collaborations. Un merci particulier à :

- A. Goelzer, V. Fromion, S. Colombié, B. Charnomordic qui ont participé activement à l'élaboration du modèle et du simulateur,
- C Gerland, dont la société (www.intellioeno.com) assure la commercialisation de ce simulateur.

Références bibliographiques

- (1) Colombié S., Malherbe S., Sablayrolles J.M., 2007. Food control, 18, 953-960
- (2) Malherbe S., Fromion V., Hilgert N., Sablayrolles J.M., 2004. Biotech. Bioeng., 86, 261-272.
- (3) Colombié S., Malherbe S., Sablayrolles J.M., 2005. Am. J. Enol. Vitic., 56, 238-245