

Innovation en matière de cavitation hydrodynamique dans le domaine de la brasserie : Efficacité, qualité et rôle central du CDR BeerLab®

Dr. Francesca Bruni, chercheuse au laboratoire chimique CDR « Francesco Bonicolini »

P2604

1. Introduction : Le changement de paradigme dans la production de bière

L'industrie brassicole moderne connaît une transition fondamentale, passant des pratiques traditionnelles à une approche de pointe en matière d'ingénierie des procédés de haute précision. Le défi pour les brasseurs contemporains est double : réduire l'empreinte énergétique des procédés et maximiser la rétention des composés bioactifs sensibles à la température tout en préservant l'intégrité organoleptique du produit final.

Dans ce contexte, la cavitation hydrodynamique (HC) s'est imposée comme un facteur de changement technologique. Il ne s'agit pas d'une optimisation progressive, mais d'un changement de paradigme capable d'intégrer et de remplacer des phases critiques telles que le brassage et l'ébullition, en opérant à des échelles micro- et nanométriques. Cependant, l'adoption industrielle de ces technologies nécessite une validation analytique rigoureuse. Le système **CDR BeerLab®** représente un point clé pour le contrôle des processus, en fournissant les données nécessaires pour traduire la dynamique complexe des fluides en excellence opérationnelle certifiée et en qualité souhaitée pour le produit fini.

2. Fondements technologiques de la cavitation hydrodynamique (HC)

La cavitation hydrodynamique est un phénomène physique caractérisé par la formation, la croissance et l'implosion subséquente de bulles de vapeur dans un liquide, déclenchée par une chute de la pression locale en dessous de la pression de vapeur. L'effondrement des bulles libère de l'énergie mécanique localisée (ondes de choc et micro-jets) et des températures ponctuelles extrêmes, tout en maintenant une température globale modérée.

Pour le traitement des moûts à haute viscosité chargés de solides en suspension, le réacteur à **tube de Venturi** s'est avéré supérieur aux plaques à orifice, assurant la stabilité de la dynamique des fluides et réduisant considérablement le risque d'encrassement ou d'obstruction. L'intensité du processus est contrôlée par le **nombre de cavitation (σ)**, défini par le rapport entre les pressions statiques et dynamiques. Des données expérimentales avancées confirment que l'efficacité de la létalité des levures n'est pas linéaire, mais présente deux maxima locaux critiques à $\sigma = 0,3$ et $\sigma = 1,7$, paramètres fondamentaux pour le réglage fin du réacteur.

D'un point de vue thermodynamique, l'HC offre des avantages uniques :

- **Chauffage semi-diabatique** : L'énergie mécanique fournie par la pompe est convertie directement en chaleur par friction interne volumétrique, ce qui élimine le besoin de

surfaces d'échange thermique à haute température.

- **Pas de gradients thermiques** : Le chauffage uniforme du volume de fluide empêche la formation de "points chauds", éliminant le risque de caramélisation du sucre et préservant la stabilité de la couleur (EBC).
- **Efficacité cinétique** : La désintégration cellulaire et l'extraction de l'amidon se produisent mécaniquement, ce qui accélère considérablement la cinétique enzymatique.

3. Analyse opérationnelle : Efficacité énergétique et amélioration de l'extraction

Dans le cadre du projet TILA (Innovative Technology for Food Liquids), la technologie de la cavitation a été étudiée pour la production de bière, dans le but de réduire les temps de production et la consommation d'énergie. Les données expérimentales recueillies au cours des essais montrent un écart évident entre les procédés traditionnels (TR) et les procédés assistés par cavitation (HC). La technologie HC simplifie l'architecture de l'usine en éliminant le broyage à sec et en réduisant considérablement les temps d'ébullition.

Paramètre de fonctionnement	Procédé traditionnel (TR)	Procédé HC (CAVIBEER)	Mécanisme physique dominant
Consommation d'énergie (cycle)	Référence 100%	Réduction > 30-40%	Élimination de l'ébullition et réduction des pertes de chaleur
Inactivation des levures (énergie)	Référence 100%	Réduction ~ 20%	Synergie entre les contraintes mécaniques et thermiques
Temps de traitement	Cycle standard	Réduction > 50%	Accélération du transfert de masse et de la saccharification
Efficacité de l'extraction de l'amidon	Standard	Augmentation de 30%	Désintégration mécanique des grains
Température de saccharification	~ 68-70°C	~ 33-35°C	Réduction du gradient de ~35°C par des moyens mécaniques

La réduction de la température de saccharification à environ **33-35°C** n'est pas seulement une économie thermique, mais une transformation de la cinétique du processus qui minimise le stress oxydatif sur les précurseurs aromatiques.

4. Excellence qualitative et profils bioactifs

La cavitation hydrodynamique améliore considérablement la qualité nutritionnelle de la bière. Au lieu de détruire ou de perdre les précieux composés du

houblon, comme c'est le cas dans le brassage traditionnel avec une ébullition forte et prolongée, cette méthode les protège et augmente même leur présence dans le produit final. En voici les principaux avantages :

• Xanthohumol (XN) et DMX (desméthylxanthohumol) :

Il s'agit de deux flavonoïdes prénylés très importants dans le houblon, connus pour leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et potentiellement protectrices contre les maladies. Lors de l'ébullition traditionnelle, la quasi-totalité du xanthohumol est convertie en une forme moins active (isoxanthohumol). Avec la cavitation hydrodynamique (HC), cette transformation est fortement réduite.

Dans un échantillon testé au cours des essais du projet, la quantité de DMX a en fait augmenté de 136 % par rapport à la quantité initiale : le processus a pratiquement protégé ces composés précieux à 100 %.

• 6-Géranylnaringénine (6-GN) :

Il s'agit d'un autre composé rare et hautement bioactif présent dans le houblon, qui a des effets antioxydants et d'autres avantages. La cavitation favorise grandement sa formation à partir des précurseurs présents dans le houblon.

Dans le même échantillon avec une forte concentration de DMX, 55 µg/L ont été atteints, un niveau très élevé qui dépasse celui typique des pale ales et se rapproche de celui des bières brunes, qui sont normalement plus riches en ce composé. La conversion a été de 20,9 %, alors qu'elle est pratiquement nulle dans la méthode traditionnelle.

• Pasteurisation douce pour protéger les arômes :

Pour rendre la bière stable et sûre, l'élimination des levures résiduelles telles que *Saccharomyces cerevisiae* nécessite généralement un chauffage à haute température (62-63°C). Avec la cavitation, il suffit d'atteindre 52 °C pour inactiver 90 % des levures.

Il s'agit d'une sorte de "pasteurisation à froid" : les arômes délicats et volatils du houblon, tels que les notes fraîches, herbacées et citronnées, sont beaucoup mieux préservés car ils ne sont pas "cuits" par une chaleur excessive.

• Réduire le gluten pour produire des bières "réduites en gluten" ou sans gluten avec des céréales traditionnelles :

La proline est la partie la plus "têtue" du gluten, celle qui résiste le plus à la digestion et qui pose des problèmes aux personnes sensibles au gluten.

En appliquant des régimes de cavitation spécifiques pendant l'ébullition et la fermentation, cette proline peut être dégradée naturellement, sans ajout d'enzymes ni modification radicale de la recette. Résultat : des bières à très faible teneur en gluten, voire "sans gluten" selon les normes, peuvent être produites en utilisant de l'orge ou

du blé normal, tout en conservant la saveur et le style traditionnels.

En d'autres termes, cette technologie permet non seulement d'économiser de l'énergie et de rendre le processus plus efficace, mais aussi de produire une bière plus riche en composés de houblon sains.

5. Le rôle du CDR BeerLab® : Optimisation et validation scientifique

Dans les expériences du CNR, le CDR BeerLab® n'a pas été un simple outil de contrôle, mais le principal dispositif de validation des modèles mathématiques de létalité de la levure (FT thermique et FC cavitationnelle). La précision photométrique a permis de calibrer rigoureusement ces modèles, en quantifiant la réduction de la viabilité cellulaire en fonction des régimes de cavitation appliqués. Sans cette précision, l'optimisation des paramètres de la dynamique des fluides resterait théorique.

Mise au point immédiate du processus : ce que CDR BeerLab® vous permet de faire en pratique

Grâce à des analyses rapides et précises, il est possible d'ajuster le processus en temps réel :

- Surveillance **IBU** et **XN** : Ajuste la vanne de pression pour optimiser l'indice de cavitation σ en fonction de l'extraction du houblon.
- **Analyse des sucres** : indique la viabilité résiduelle de la levure, validant sur place les modèles de létalité (plus de sucres résiduels = levure moins viable).
- Détermination de la stabilité de la **couleur** et de l'**alcool** : vérification de l'absence d'oxydation et de la régularité de la fermentation après cavitation.

La précision du CDR BeerLab® nous a permis de corréler les données réelles avec la létalité, en identifiant expérimentalement les pics d'efficacité maximale à $\sigma = 0,3$ et $\sigma = 1,7$.

Grâce à ces mesures photométriques continues, les chercheurs ont confirmé et optimisé le processus de manière concrète et fiable.

6. Conclusions : Vers la brasserie 4.0

L'intégration de la technologie "CAVIBEER" et la précision analytique **CDR BeerLab®** la voie au brassage industriel du futur. Les résultats sont clairs : des économies d'énergie de plus de 30 %, des durées de cycle réduites de moitié et un profil bioactif amélioré.

La synergie entre une ingénierie des fluides avancée et un contrôle de qualité rigoureux est la pierre angulaire d'une production durable, saine et techniquement supérieure. La transition vers une brasserie 4.0 passe nécessairement par cette union de l'innovation mécanique et de la certitude analytique.