

Stratégies de suivi analytique rapide en cidrerie : mesures chimiques et préventives contre les altérations microbiologiques

Dr. Simone Bellassai, Œnologue chimiste, expert en analyse chimique sur les aliments et les boissons - Responsable de la division CDR FoodLab®

P2623

1. Introduction : défis biochimiques et vulnérabilité technologique du moût de pomme

La production d'un cidre de haute qualité exige un contrôle rigoureux des processus biochimiques et enzymatiques complexes qui gouvernent la transformation de la matière première. Par rapport au moût de raisin, le jus de pomme présente une sensibilité marquée aux phénomènes oxydatifs ainsi qu'une concentration en nutriments azotés souvent limitante pour le métabolisme des levures. Ces défis technologiques sont particulièrement évidents dans le profil du cidre de Hardanger. L'utilisation de cultivars de pommes de table tels que *Summerred*, *Aroma*, *Discovery* et *Gravenstein* vise à obtenir un produit final frais et léger, mais impose également des contraintes chimiques strictes en raison d'une concentration phénolique réduite et, dans certains cas, de valeurs d'acidité élevées.

Dans ce contexte, l'optimisation du procédé nécessite de dépasser une logique d'intervention *ex post*, nécessairement limitée à la correction d'altérations organoleptiques déjà manifestes, au profit d'une stratégie analytique prédictive et préventive. Le suivi analytique systématique permet en effet d'identifier précocement les déviations métaboliques avant qu'elles ne se traduisent par des défauts irréversibles. Tant en fermentation conduite qu'en conditions semi-naturelles, l'analyse constante des paramètres chimiques constitue un outil fondamental pour garantir la stabilité physico-chimique du cidre. Aujourd'hui, la transition vers ce modèle prédictif est facilitée par l'introduction de systèmes analytiques optimisés, tels que le système **CDR CiderLab**, qui permettent de réaliser des dépistages multiparamétriques directement sur la ligne de production, en éliminant les délais d'attente liés aux analyses effectuées par un laboratoire externe.

Paramètre	Seuil critique	Risque	Action corrective	Moment recommandé
Azote Assimilable (APA)	100 mg/L	Ralentissements ou arrêts de fermentation ; synthèse de sulfure d'hydrogène (H ₂ S), avec défaut de réduction et odeur d'œuf pourri.	Apport calibré de sels d'ammonium, comme le phosphate diammonique (DAP), ou de nutriments organiques complexes.	Phase préfermentaire, avant l'inoculation.
Acide acétique (acidité volatile)	0.6 g/L	Piqûre acétique ; production d'acétate d'éthyle, avec odeur de solvant ou de colle.	Suppression de l'espace de tête dans les cuves par ouillage ; réintégration ciblée de SO ₂ libre.	Phase de stockage ou de keeving ; suivi destiné à détecter les tendances à la hausse.
Dioxyde de soufre (SO ₂) et pH	pH > 3.8	Inefficacité du SO ₂ ; développement de <i>Brettanomyces spp.</i> et de <i>Saccharomyces ludwigii</i> , avec formation d'agrégats cellulaires.	Correction préalable de l'acidité avec de l'acide malique afin de ramener le pH à des valeurs < 3,8 avant le sulfitage.	Avant le sulfitage et pendant le stockage.
Acide L-malique	< 0.5 g/L en fin de fermentation ; cidres frais/nordiques : 4.0-6.0 g/L	Fermentation malolactique (FML) spontanée après la mise en bouteille, avec trouble et surpression ; perte de fraîcheur dans les variétés à faible acidité.	Soutirages ; stabilisation avec du dioxyde de soufre (SO ₂) ; éventuelle acidification exogène si pH > 3,8.	Pendant la dégradation de l'acide malique et avant le conditionnement.
Sucres résiduels	Selon le style, de < 2,0 g/L pour un cidre sec à 40,0 g/L pour un cidre doux	Sur-atténuation avec perte de corps, ou fermentations secondaires en bouteille avec surcarbonatation et risque d'éclatement.	Soutirages pour arrêter la fermentation ; chaptalisation avec du saccharose afin de créer une barrière alcoolique de 6-7 % vol.	Phase tardive de la fermentation et avant la mise en bouteille.

Tableau 1 — Cartographie des paramètres critiques dans le contrôle du procédé de fabrication du cidre

2. Azote assimilable (YAN) : régulation de la cinétique fermentaire

L'azote assimilable, également appelé azote rapidement assimilable (YAN), constitue le principal facteur limitant de la cinétique fermentaire dans le moût de pomme. Une disponibilité insuffisante de cette fraction nutritionnelle provoque non seulement des ralentissements ou des arrêts de fermentation alcoolique, mais agit également comme déclencheur biochimique de déviations importantes du profil aromatique. Une carence en YAN compromet la synthèse protéique, y compris celle des complexes enzymatiques de la biomasse cellulaire. En conditions de stress nutritionnel, le métabolisme de la levure active la voie de réduction des sulfates et des sulfites, provoquant la synthèse et la libération de sulfure d'hydrogène (H₂S), un composé volatil qui confère au cidre des notes soufrées désagréables, associées à une odeur d'œuf pourri et caractéristiques d'un défaut de réduction. En outre, une cinétique fermentaire excessivement faible prolonge le temps de séjour du moût, augmentant de manière exponentielle le risque d'oxydations précoces et de développement de micro-organismes contaminants.

Le suivi analytique exige la détermination quantitative de l'YAN total, exprimé comme la somme de l'azote ammoniacal, de nature inorganique, et de l'azote aminé libre, de nature organique, également appelé FAN. Cette détermination doit impérativement être réalisée en phase préfermentaire. Grâce à la **méthode enzymatique rapide** de CDR CiderLab, cette donnée est obtenue en quelques minutes, sans nécessité de prétraitements complexes de l'échantillon, permettant au technologue de cartographier en temps réel la disponibilité nutritionnelle réelle du lot. Les analyses effectuées sur les cultivars de la région du Hardanger montrent une forte variabilité et des niveaux souvent insuffisants, allant d'un minimum de 0,8 mg/L pour la variété *Discovery* à un maximum de 101 mg/L pour *Summerred*. Le seuil technique de sécurité permettant de garantir le métabolisme basal de la levure et une cinétique fermentaire régulière est estimé à 100 mg/L d'APA. Si l'essai analytique met en évidence une concentration inférieure à cette valeur limite, il est nécessaire de procéder, avant l'inoculation, à un apport calibré de sels d'ammonium, comme le phosphate diammonique (DAP), ou de nutriments organiques complexes.

3. Acide L-malique et acide L-lactique : contrôle de la fermentation malolactique (FML)

L'acide L-malique constitue le principal pilier de l'acidité fixe dans le moût de pomme, avec des pics pouvant atteindre 22,1 g/L dans la variété *Aroma*. Le suivi de sa dégradation et de sa conversion simultanée en **acide L-lactique** par fermentation malolactique (FML) est un prérequis critique pour la stabilité du produit. Une FML spontanée après la mise en bouteille peut altérer gravement le cidre, en provoquant un trouble, des arômes désagréables et une dangereuse surpression de CO₂. À l'inverse, si elle est laissée libre d'agir dans des variétés déjà peu acides, elle peut atténuer nettement la fraîcheur du produit.

La **détermination quantitative de l'acide malique** au moyen de tests enzymatiques et photométriques optimisés sur la plateforme CDR CiderLab permet de cartographier les cinétiques de dégradation avec précision analytique et des temps de réponse immédiats. Le suivi de ce paramètre est essentiel en raison des différences marquées entre les cultivars : l'acide malique chute de 70 % dans *Gravenstein*, alors qu'il ne diminue que de 9 % dans *Summerred*. Une analyse réalisée au bon moment guide le producteur dans des choix de procédé décisifs, notamment le moment où effectuer les soutirages et celui où bloquer le processus avec du dioxyde de soufre (SO₂). De plus, dans les moûts présentant un pH > 3,8, l'acidification exogène avec de l'acide malique agit comme mesure préventive, en rétablissant l'équilibre organoleptique et en augmentant la fraction de SO₂ moléculaire active contre les contaminations microbiennes.

4. Acidité volatile (acide acétique) : suivi préventif de la piqûre acétique

L'acide acétique est le principal indicateur de l'acidité volatile : il reflète la propreté de la ligne de production et la bonne gestion de l'oxygène, en particulier lors de phases délicates comme le stockage ou le *keeving*. Si cette valeur augmente de manière incontrôlée, le cidre est exposé au risque de piqûre acétique. Cette altération s'accompagne souvent de la production d'acétate d'éthyle, qui dégrade le produit par des odeurs désagréables de solvant et de colle. Ce défaut est étroitement lié à l'activité métabolique précoce de bactéries acétiques ou de levures apiculées opportunistes, parmi lesquelles *Hanseniaspora valbyensis* (syn. *Kloeckera apiculata*), dont la prolifération est favorisée par la présence d'oxygène et par des concentrations de dioxyde de soufre (SO₂) inférieures au seuil minimal d'inhibition. Le suivi analytique quantitatif joue le rôle de système d'alerte précoce, car il permet d'intercepter les déviations cinétiques avant que le défaut ne soit perceptible à l'olfaction. Grâce au système CDR

CiderLab, la **quantification de l'acide acétique** peut être réalisée en **10 minutes** par une réaction enzymatique sur des microquantités d'échantillon. Bien que le seuil technique d'acceptabilité soit fixé à un maximum de 0,6 g/L, les cidres caractérisés par un standard qualitatif élevé présentent des valeurs stables et proches de la limite de quantification instrumentale. L'approche préventive repose sur l'identification de toute tendance à la hausse. La mise en évidence analytique d'une augmentation impose l'adoption immédiate de mesures de maîtrise, telles que la suppression de l'espace de tête dans les cuves par ouillage et la réintégration ciblée de SO₂ libre.

5. Dioxyde de soufre (SO₂) : la chimie de la protection sélective

Le dioxyde de soufre (SO₂) représente le principal agent de sélection microbiologique et de protection antioxydante dans le procédé de fabrication du cidre. L'efficacité de cet additif est étroitement conditionnée par le pH du milieu, qui gouverne son équilibre chimique en solution. Dans des milieux faiblement acides (pH > 3,8), typiques des moûts obtenus à partir de cultivars de pommes *bittersweet*, où des valeurs allant jusqu'à pH 4,2 peuvent être observées, la fraction active du dioxyde de soufre diminue fortement. Cette condition expose le produit, pendant le stockage, à de graves altérations induites par des levures contaminantes et résistantes, telles que *Brettanomyces spp.* et *Saccharomyces ludwigii*. Cette dernière est connue pour sa capacité à générer des agrégats cellulaires denses au fond des bouteilles, compromettant la stabilité visuelle du cidre.

Le protocole de contrôle doit se concentrer sur le suivi analytique combiné du **SO₂ libre** et **total**, ainsi que de la **valeur du pH**. En effet, lorsque le pH augmente, l'équilibre du dioxyde de soufre se déplace vers les formes bisulfite et sulfite, réduisant la fraction de SO₂ moléculaire, seule forme capable de traverser la membrane cellulaire des micro-organismes et d'exercer une action biocide. À pH 4,2, un dosage standard de 150 mg/L se révèle biologiquement inefficace. L'approche préventive impose donc une correction préalable de l'acidité par ajout exogène d'acide malique, afin de ramener le moût à des valeurs inférieures à pH 3,8 avant le sulfitage.

6. Sucres résiduels et densité : gestion de la stabilité en bouteille

La détermination de la densité relative, ou *specific gravity* (SG), et le suivi analytique du rapport glucose/fructose représentent des paramètres fondamentaux pour estimer le Degré Alcoolique

volumique final et contrôler la pression partielle de CO₂ endogène dans le produit conditionné. Les souches de *Saccharomyces cerevisiae* métabolisent préférentiellement le glucose et laissent le fructose comme constituant majoritaire de la fraction glucidique tardive. Un déroulement fermentaire non contrôlé, avec épuisement total des sucres, c'est-à-dire une sur-atténuation, prive le cidre de corps et de rondeur en bouche. À l'inverse, la présence de sucres résiduels non biologiquement stables expose le lot au risque de cinétiques secondaires tardives après la mise en bouteille. Ce phénomène induit des défauts de surcarbonatation incontrôlée et augmente la pression interne.

Sur le plan analytique, l'évaluation de la densité relative doit être intégrée à la cartographie quantitative du profil des sucres résiduels. La **détermination rapide des différentes fractions glucidiques, à savoir glucose, fructose et saccharose**, réalisable avec CDR CiderLab, permet de valider la donnée densimétrique et de guider avec précision les opérations de soutirage nécessaires à l'arrêt de la fermentation. C'est ici qu'intervient la chaptalisation : l'ajout de saccharose pour porter l'alcool à 6-7 % vol sert à créer une véritable barrière microbiologique. L'alcool supplémentaire, associé au pH acide et au SO₂, protège les sucres restant en bouteille contre les fermentations indésirables, garantissant ainsi la stabilité du produit.

7. Conclusions

Dans la cidrerie moderne, les analyses réalisées directement sur la ligne de production ne constituent ni un coût ni une complication, mais un choix stratégique indispensable pour protéger le produit et valoriser chaque lot. La capacité à transformer l'intuition artisanale en précision scientifique quantifiable représente le seul moyen de prévenir la perte partielle ou totale de lots de production, tout en garantissant la constance qualitative et la reconnaissabilité sensorielle exigées par le marché mondial.

Dans ce cadre d'évolution méthodologique, le système **CDR CiderLab** se présente comme une **solution analytique optimisée pour le contrôle de procédé**. Grâce à des tests photométriques en cuvettes préremplies, le système dépasse les contraintes opérationnelles du laboratoire chimique traditionnel : il élimine la nécessité de calibrations complexes, réduit fortement la manipulation des réactifs et requiert uniquement des microvolumes d'échantillon, évitant ainsi les étapes préalables longues et laborieuses de filtration ou de centrifugation. Sa grande rapidité d'exécution permet l'adoption de mesures correctives

immédiates directement dans l'environnement de production.

Sitographie et ressources institutionnelles internationales

Ces liens représentent les principales plateformes de recherche, services d'extension universitaire et instituts techniques consacrés à la science de la fabrication du cidre :

- **ScienceDirect Topics – Cider (Agricultural and Biological Sciences)** Ressource encyclopédique et scientifique permettant de consulter des chapitres d'ouvrages et des articles de synthèse sur la biochimie du cidre.

Link: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/cider>

- **Cornell AgriTech (Cornell University) – Hard Cider Products & Research** Centre académique d'excellence pour l'étude des cultivars, de la fermentation et du développement technologique de la filière cidricole.

Link: <https://cals.cornell.edu/cornell-agritech/products-we-research/hard-cider>

- **Agriculture Institute – Industrial Cider Production Techniques & Technology** Portail technique axé sur la chimie alimentaire, la physiologie des micro-organismes et les pratiques modernes de cave à l'échelle industrielle.

Link: <https://agriculture.institute/food-chemistry-and-physiology/industrial-cider-production-techniques-technology/>

- **The Wittenham Hill Cider Pages (Andrew Lea) – Cider and Perry Making** L'une des ressources historiques, techniques et scientifiques de référence pour les protocoles traditionnels et modernes de fabrication du cidre.

Link: <https://www.cider.org.uk/frameset.htm>

- **Washington State University (WSU) – Cider Research & Extension** Programme universitaire spécialisé dans l'analyse des matrices fruitières, les essais de fermentation et la stabilité microbiologique du cidre.

Link: <https://cider.wsu.edu/>

- **Cider Institute of North America (CINA)** Organisation de référence pour la formation professionnelle, la standardisation des paramètres physico-chimiques et les certifications dans le domaine de la fabrication du cidre.

Link: <https://www.ciderinstitute.com/>