

Evaluation des paramètres biochimiques du moût de sorgho durant dix-huit heures de fermentation discontinue

[Assessment of biochemical parameters of sorghum wort for eighteen hours of batch fermentation]

Benjamin Kan KOUAME¹, Casimir Anauma KOKO¹, Massé DIOMANDE¹, and Emmanuel Nogbou ASSIDJO²

¹Département de Biochimie et Microbiologie,
Université Jean Lorougnon Guédé,
BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

²Laboratoire des Procédés Industriels, de Synthèse et de l'Environnement,
Institut National Polytechnique Yamoussoukro,
BP 1313 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The fermentation process of Sorghum wort is one of the fundamental steps that determine the quality of tchapalo (traditional beer). Its assessment through biochemical parameters such as pH, temperature, total soluble solids (substrate), biomass, released carbon dioxide and alcohol (ethanol) content allowed capitalizing values during the experiments. Analysis of the evolution of these biochemical parameters showed significant variations ($P < 0.05$) during the batch fermentation process of sorghum wort. Thus, the biomass reached a maximum average of 27.64 (± 7.83) g/L at the eleventh hour of fermentation and then decreased drastically, until an average of 4.40 (± 1.00) g/L at the end of fermentation. The maximum temperature value (32.50 (± 0.69) °C) was recorded at the ninth hour of fermentation while that of the carbon dioxide (88.11 (± 4.48) ppm) is obtained at the fourteenth hour of fermentation. While considering the eighteenth hour of fermentation, it was noted that the pH of sorghum wort stays very acid (2.88 (± 0.55)). Similarly, it was observed a decrease of more than half the levels of total soluble solids in sorghum wort after fermentation. In contrary, the alcohol content increased to reach a maximum average of 5.24 (± 1.14)% (v / v) at the end of fermentation. These results constitute an important data base for the industrialization of the manufacture of tchapalo whose consumption is rising.

KEYWORDS: Tchapalo, batch fermentation, sorghum wort, biomass, traditional beer, Côte d'Ivoire.

RESUME: Le processus de fermentation du moût de sorgho est l'une des étapes fondamentales qui déterminent la qualité du "tchapalo" (bière traditionnelle). Son évaluation à travers les paramètres biochimiques tels que le pH, la température, l'extrait sec réfractométrique (substrat), la biomasse, le dioxyde de carbone dégagé et l'alcool produit (éthanol) a permis de capitaliser des valeurs durant les expérimentations. L'analyse de l'évolution de ces paramètres biochimiques a montré que ceux-ci présentent des variations significatives ($P < 0,05$) au cours du processus de fermentation discontinue du moût de sorgho. Ainsi, la biomasse a atteint une valeur moyenne maximale de 27,64 ($\pm 7,83$) g/L à la onzième heure de fermentation puis, a diminué de façon drastique en atteignant une valeur moyenne de 4,40 ($\pm 1,00$) g/L en fin de fermentation. La valeur maximale de température (32,50 ($\pm 0,69$) °C) a été enregistrée à la neuvième heure de fermentation pendant que celle du dioxyde de carbone dégagé (88,11 ($\pm 4,48$) ppm) est obtenue à la quatorzième heure de fermentation. En considérant les dix-huitièmes heures de fermentation, il a été noté que le pH du moût de sorgho reste très acide (2,88 ($\pm 0,55$)). De même, il a été observé une diminution de plus de la moitié des teneurs en extrait sec réfractométrique du moût de sorgho en fin de fermentation. Par contre, la teneur en alcool a augmenté pour atteindre une valeur moyenne maximale de 5,24 ($\pm 1,14$) %

(v/v) en fin de fermentation. Les résultats obtenus constituent une importante base de données pour une industrialisation de la fabrication du "tchapalo" dont la consommation est croissante.

MOTS-CLEFS: Tchapalo, fermentation discontinue, biomasse, moût sorgho, bière traditionnelle, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Le "tchapalo" est une bière traditionnelle alcoolisée produite et consommée dans plusieurs pays d'Afrique [1]. En Côte d'Ivoire, le "tchapalo" est toujours fabriqué de manière artisanale sur toute l'étendue du territoire avec une consommation croissante [1]. La production de cette bière traditionnelle par les femmes passe par une étape de fermentation lactique spontanée, puis par une étape de fermentation alcoolique. Cette dernière se fait avec des ferments traditionnels non sélectionnés généralement issus de dépôts séchés des productions précédentes. Ces ferments constituent la source de microorganismes actifs de la fermentation alcoolique du moût [2]. En effet, les microorganismes de ces ferments, de par leurs activités métaboliques, contribuent au développement des propriétés caractéristiques (notamment le goût, l'arôme, l'apparence visuelle et les valeurs nutritionnelles) du produit final [2], [3].

Malgré la multitude de sites de production qui ne cessent d'augmenter, la fabrication et la commercialisation du "tchapalo" restent confrontées à de multiples problèmes. En effet, la production de cette bière se fait de façon artisanale et dans des conditions qui n'ont pas évolué avec le temps. Par ailleurs, sa fabrication se déroule toujours dans des conditions hygiéniques déplorables avec une utilisation de matériel rudimentaire et des opérations pénibles.

Le processus de fermentation alcoolique lors de la production du "tchapalo" reste incontrôlé. Pourtant, c'est une opération essentielle [4]. Celle-ci demeure un processus entièrement microbien difficile à contrôler de sorte que la qualité marchande du "tchapalo", reste variable et aléatoire. Pour résoudre ce problème, une maîtrise des paramètres de fermentation apparaît comme un pas essentiel.

La présente étude a pour objectif d'évaluer les paramètres biochimiques du moût de sorgho durant dix-heures heures de fermentation discontinue. Il s'agit, plus spécifiquement, de suivre l'évolution des paramètres biochimiques de façon périodique et simultanée (une heure d'intervalle) pendant toute la durée de la fermentation discontinue du moût. Le suivi de ces paramètres permettra de mieux contrôler le processus de fermentation et de disposer d'une importante base de données pour les recherches ultérieures.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 PREPARATION DU MOUT DE SORGHO ET MISE EN PLACE DES FERMENTATIONS

La préparation de moût sucré de sorgho est effectuée selon une méthode traditionnelle, utilisée par les brasseuses de la ville de Yamoussoukro (centre de la Côte d'Ivoire) et décrite par Amané *et al.* [5]. Cette préparation est basée sur les deux étapes fondamentales de la fabrication de cette bière traditionnelle locale ("tchapalo") : le maltage et le brassage.

Pour une expérimentation, cinq (05) litres de moût de sorgho sont produits selon la méthode décrite par Amané *et al.* [5]. Le moût de sorgho ainsi obtenu est uniquement utilisé pour des fermentations alcooliques à l'échelle de laboratoire. En effet, pour chaque essai de fermentation discontinue les cinq (05) litres du moût sucré de sorgho obtenus sont introduits dans un micro-fermenteur. L'inoculation du moût sucré de sorgho contenu dans le micro-fermenteur est réalisée par une quantité de 10 g de ferments traditionnels comme décrite par Amané [2]. La fermentation alcoolique a débuté après la phase d'initialisation des ferments dans le milieu réactionnel. Au total, trente (30) essais de fermentation discontinue du moût de sorgho ont été réalisés et se sont déroulés à la température ambiante (25-32 °C). Les paramètres tels que le pH, la température, la teneur en sucres (l'extrait sec réfractométrique), la biomasse, le dioxyde de carbone et l'alcool (éthanol) du moût de sorgho en fermentation sont suivis de façon périodique et simultanée (une heure d'intervalle) pendant 18 heures.

2.2 SUIVI DES PARAMETRES BIOCHIMIQUES AU COURS DE LA FERMENTATION DISCONTINUE

La valeur du pH du moût de sorgho en fermentation ($t=0$ à 18 heures de fermentation) est déterminée selon la méthode décrite par Amané *et al.* [5] grâce à un pH-mètre (HANNA HI98240). La sonde du pH-mètre, préalablement calibrée, est plongée dans un volume de 20 mL du moût de sorgho en fermentation. La valeur du pH est directement lue sur l'écran de l'appareil après 3 min de stabilisation.

La valeur de la température du moût de sorgho en fermentation est déterminée grâce à un thermomètre stérile (ASPINA 09654.40, France) incorporé directement dans le micro-fermenteur. Ce thermomètre a permis de suivre directement la fluctuation de la température du moût de sorgho en fermentation (t=0 à 18 heures de fermentation). La température a été exprimée en degré Celsius.

L'extrait sec réfractométrique (ou la teneur en sucres ou substrat) du moût de sorgho en fermentation (t=0 à 18 heures de fermentation) est déterminé à l'aide d'un réfractomètre manuel (51295 MC, France). Le Brix réfractométrique exprime la quantité de matières solubles dans la solution en fermentation.

Les teneurs en dioxyde de carbone (CO₂) du moût de sorgho en fermentation (t=0 à 18 heures de fermentation) sont déterminées à l'aide d'un analyseur de gaz CO₂ incorporé dans le Micro-fermenteur. Cette teneur en dioxyde de carbone lue est exprimée en partie par millions (ppm).

Les teneurs en alcool (%) sont déterminées par une méthode de distillation suivie de titrage d'alcool. En effet, un volume V₀ de 40 mL du moût de sorgho en fermentation (t=0 à 18 heures de fermentation) est prélevé dans des Béchers de capacité 50 mL et est admis dans le ballon du dispositif de distillation contenant six petits grains de pierre ponce. Le chauffage est assuré jusqu'à atteindre 78 °C par un chauffe ballon du dispositif de distillation. Au bout de 20 minutes, un volume V₁ de 20 mL de distillat est recueilli. L'indice réfractométrique du distillat de volume V₁, a été lu grâce au réfractomètre à main (51295 MC, France). Les teneurs en alcool (%) sont déterminées par rapport à une courbe d'étalonnage préalablement établie à l'aide de l'éthanol 90 %. Ces teneurs en alcool sont par la suite ramenées au volume V₀ du moût frais de sorgho en fermentation selon la relation suivante :

$$\% \text{ alcool réel} = \frac{V_1}{V_0} \times (\% \text{ alcool}) \quad (1)$$

V₁ = volume du distillat

V₀ = volume initial prélevé du moût frais de sorgho en fermentation

La biomasse (quantité microbienne) est quantifiée par la méthode gravimétrique [6]. En effet, cette méthode gravimétrique a permis de calculer le poids sec d'un volume donné des moûts de sorgho par dessiccation par infrarouge. Une quantité de 25 mL du moût de sorgho en fermentation (t=0 à 18 heures de fermentation) est prélevée et centrifugée à 5 °C pendant 10 minutes, à 12 000 trs/min. Le culot est ensuite récupéré. Une nouvelle centrifugation du culot dans les mêmes conditions a permis de récupérer la biomasse totale. Celle-ci est alors séchée et pesée par un analyseur d'humidité (thermobalance, PRECISA HA60). La biomasse obtenue en concentration cellulaire est exprimée en gramme par litre (g/L).

2.3 TRAITEMENTS STATISTIQUES DES DONNEES EXPERIMENTALES

Afin d'éliminer des essais aberrants de fermentation discontinue et en raison de la forme trilineaire du système (temps de fermentation, différents essais de fermentation et six paramètres de fermentation analysés), une analyse de PARAFAC, a été réalisée. Le PARAFAC est une méthode de décomposition multidimensionnelle provenant de la psychométrie [7], [8]. Il peut être conceptuellement comparé à l'Analyse en Composante Principale (ACP) bilinéaire, ou plutôt à une généralisation de l'ACP bilinéaire [9], [10]. C'est une méthode de réduction et de regroupement qui permet d'identifier les essais de fermentation discontinue du moût de sorgho relativement homogènes dans une structure tridimensionnelle. Autrement dit, elle permet la répartition des essais de fermentation discontinue du moût de sorgho (individus) sur les deux autres composantes principales (temps de fermentation et six paramètres de fermentation analysés). Le principe de la méthode est d'obtenir une représentation approchée du nuage des individus dans un sous-espace de faible dimension. Cette méthode consiste en une projection des essais de fermentation alcoolique du moût de sorgho sur ce nouveau sous-espace en faisant en sorte que les distances soient les moins déformées possibles. La représentation des essais de fermentation discontinue du moût de sorgho sous forme de nuage de points a été réalisée avec le logiciel SPSS.10.07.

Par ailleurs, les données recueillies au cours de la fermentation discontinue du moût de sorgho ont été aussi soumises à une analyse de variance (ANOVA). Les différences ont été considérées comme significatives pour des valeurs de P < 0,05.

3 RESULTATS

3.1 ANALYSE DES DIFFERENTS ESSAIS DE FERMENTATION DISCONTINUE PAR LE PARAFAC

L'analyse de PARAFAC effectuée sur les trente essais de fermentation discontinue a permis de réduire et de regrouper ces essais à travers un ensemble de points (Figure 1).

La figure 1 présente la répartition des individus (différents essais de fermentation discontinue) sur les deux premières composantes principales que sont le temps de fermentation (Composante 1) et les paramètres de fermentation analysés (composante 2). L'analyse de PARAFAC a révélé la présence d'un groupe de points délimités par l'ellipse d'intervalle de confiance 95 %. Ces points, correspondant aux essais de fermentation discontinue du moût de sorgho ; sont de façon générale, très proches les uns des autres. Toutefois, il a été observé un éloignement prononcé de deux points par rapport aux autres, c'est-à-dire en dehors de l'ellipse d'intervalle de confiance 95 %. Cet éloignement indique que les deux essais de fermentation discontinue du moût de sorgho relatifs à ces points n'ont pas évolué comme les autres.

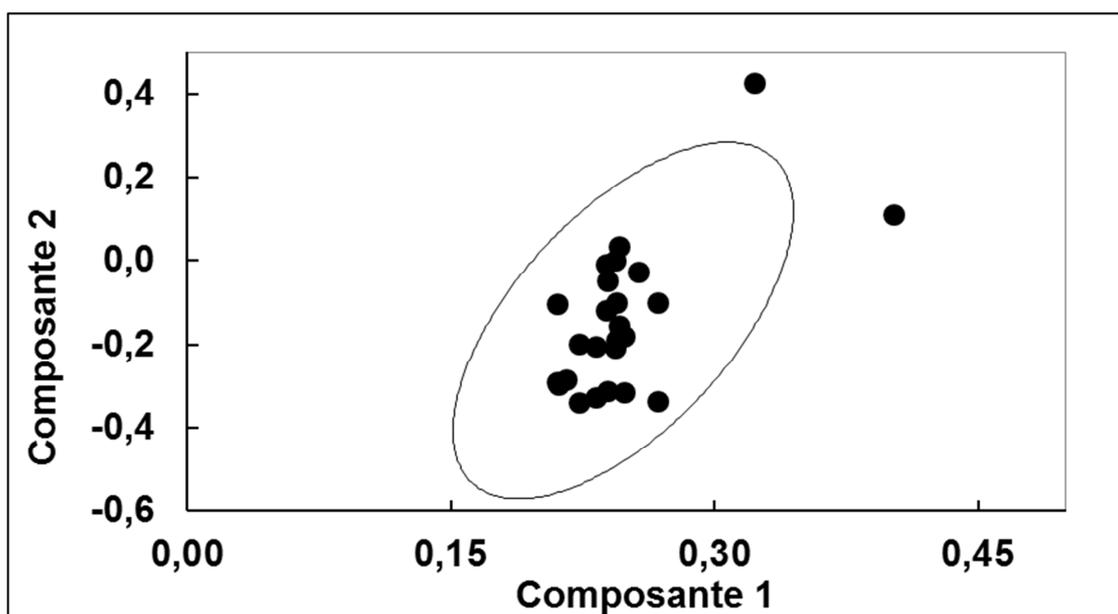


Fig. 1. Projection des différents essais de fermentation discontinue du moût de sorgho sur les deux premières composantes principales du PARAFAC

3.2 EVOLUTION DES PARAMETRES BIOCHIMIQUES DU MOUT DE SORGHO DURANT DIX-HEURES DE FERMENTATION

Les différentes évolutions du pH, de la température, de la biomasse, du substrat, du dioxyde de carbone dégagé et de la teneur en alcool sont représentées respectivement par les figures 2, 3, 4, 5, 6 et 7. L'analyse de ces figures montre de façon générale que les valeurs moyennes du pH, de la température, du substrat, de la biomasse, du dioxyde de carbone dégagé et de l'alcool produit du moût de sorgho varient au cours du temps de la fermentation. Le pH moyen du moût de sorgho en fermentation diminue légèrement d'une valeur moyenne de 3,04 ($\pm 0,25$) en début de fermentation à une valeur moyenne de 2,88 ($\pm 0,55$) à la quinzième heure de fermentation, puis demeure constant jusqu'en fin de fermentation (Figure 2). Il reste acide pendant les 18 heures de fermentation. Quant aux valeurs moyennes de la température du moût de sorgho en fermentation, elles évoluent progressivement en début de fermentation d'une valeur moyenne de 26,07 ($\pm 1,72$) °C pour atteindre une valeur maximale de 32,50 ($\pm 0,69$) °C à la neuvième heure de fermentation, puis décroît jusqu'à la valeur moyenne de 30,41 ($\pm 0,5$) °C en fin de fermentation (Figure 3). Contrairement aux valeurs moyennes de la température du moût de sorgho, les valeurs moyennes de l'extrait sec réfractométrique (substrat) du moût de sorgho diminuent progressivement d'une valeur moyenne de 14 ($\pm 1,15$) °Brix en début de fermentation à une valeur moyenne de 6,60 ($\pm 1,04$) °Brix en fin de fermentation (Figure 4). En considérant la dix-huitième heure de fermentation, il a été observé une diminution de plus de la moitié des teneurs en extrait sec réfractométrique du moût de sorgho en fin de fermentation.

Les valeurs moyennes de la biomasse (quantité microbienne) du moût de sorgho varient légèrement d'une valeur moyenne de 0,80 ($\pm 0,64$) g/L à une valeur de 2,70 ($\pm 0,12$) g/L entre zéro et la cinquième heure de fermentation, puis

augmentent exponentiellement jusqu'à la neuvième heure de fermentation atteignant une valeur moyenne de 27,00 (\pm 5,13) g/L. Elles restent par la suite, légèrement constantes et atteignent une valeur moyenne de 27,64 (\pm 7,83) g/L à la onzième heure de fermentation. Au-delà de la onzième heure, elles diminuent de façon drastique en atteignant une valeur moyenne de 4,40 (\pm 1,00) g/L en fin de fermentation (Figure 5).

Quant aux valeurs moyennes de dioxyde de carbone dégagé du moût de sorgho, elles augmentent de zéro à une valeur moyenne de 88,11 (\pm 4,48) ppm entre la première et la quatorzième heure de fermentation, puis décroissent légèrement pour atteindre une valeur moyenne de 85,95 (\pm 5,02) ppm en fin de fermentation (Figure 6). Parallèlement aux valeurs moyennes de dioxyde de carbone dégagé, les teneurs moyennes en alcool (éthanol) du moût de sorgho augmentent respectivement d'une valeur moyenne de 0,01 (\pm 0,00) % (v/v) en début de fermentation à une valeur moyenne de 5,24 (\pm 1,14) % (v/v) en fin de fermentation (Figure 7).

Par ailleurs, les analyses de variance ont révélé des variations significatives ($P < 0,05$) de certains paramètres biochimiques du moût au cours de la fermentation discontinue. Il s'agit de la de la température, de la biomasse, du substrat, du dioxyde de carbone dégagé et de la teneur en alcool

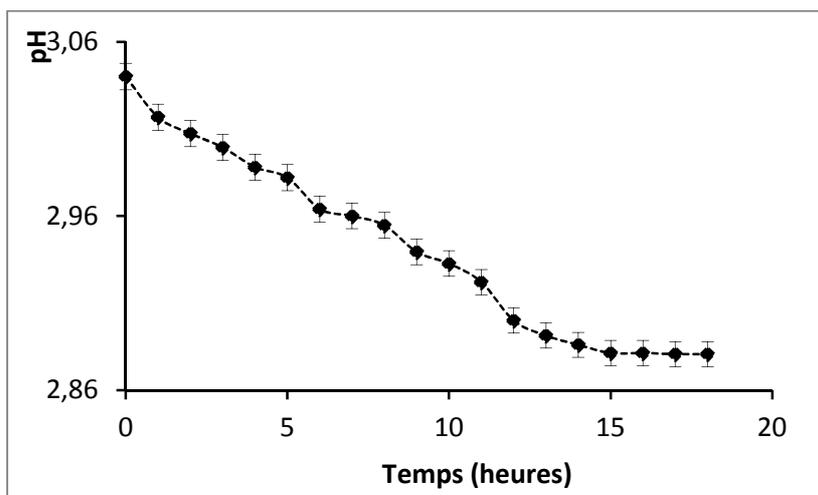


Fig. 2. Evolution du pH du moût de sorgho durant les dix-heures de fermentation discontinue

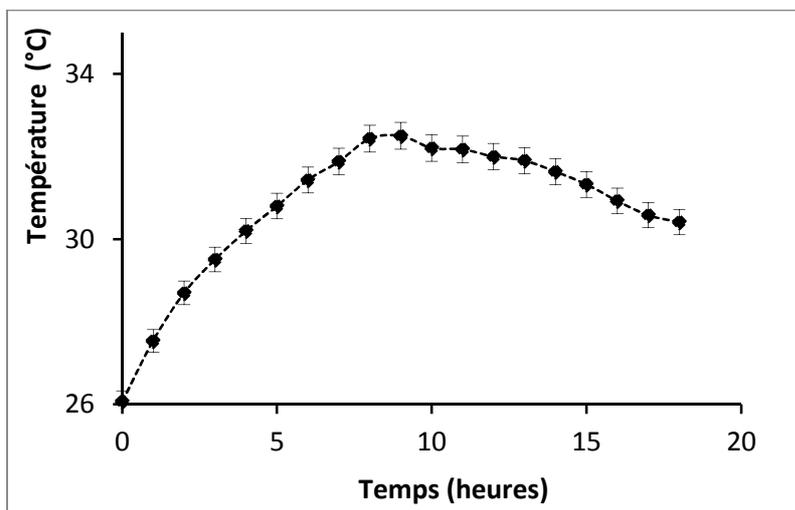


Fig. 3. Evolution de la température du moût de sorgho durant les dix-heures de fermentation discontinue

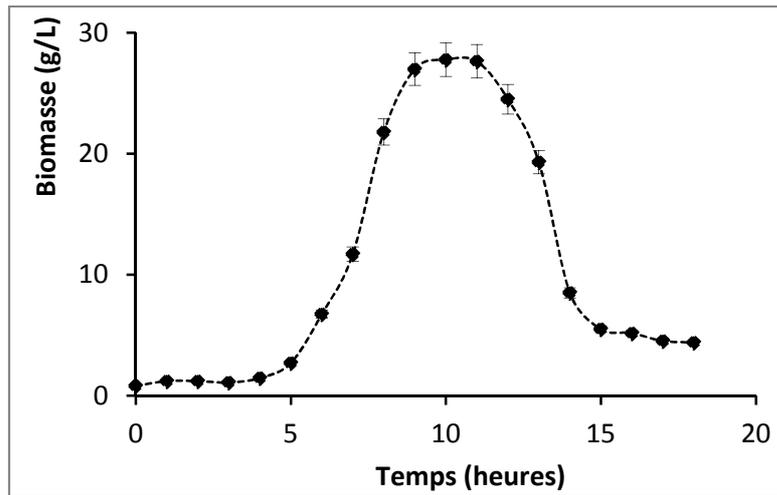


Fig. 4. Evolution de la biomasse du moût de sorgho durant les dix-heures de fermentation discontinue

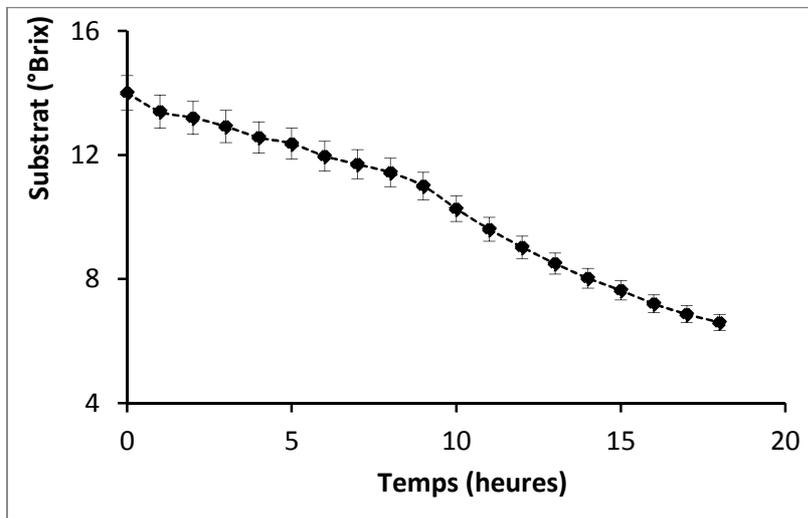


Fig. 5. Evolution du substrat du moût de sorgho durant les dix-heures de fermentation discontinue

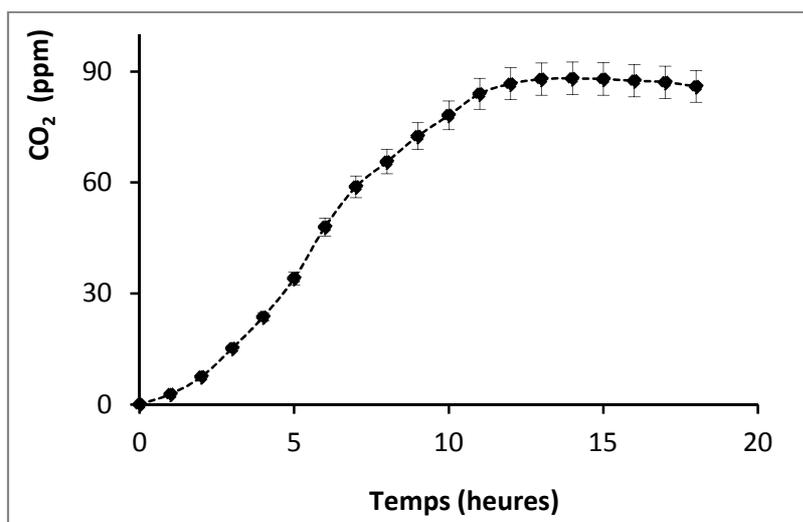


Fig. 6. Evolution du CO₂ du moût de sorgho durant les dix-heures de fermentation discontinue

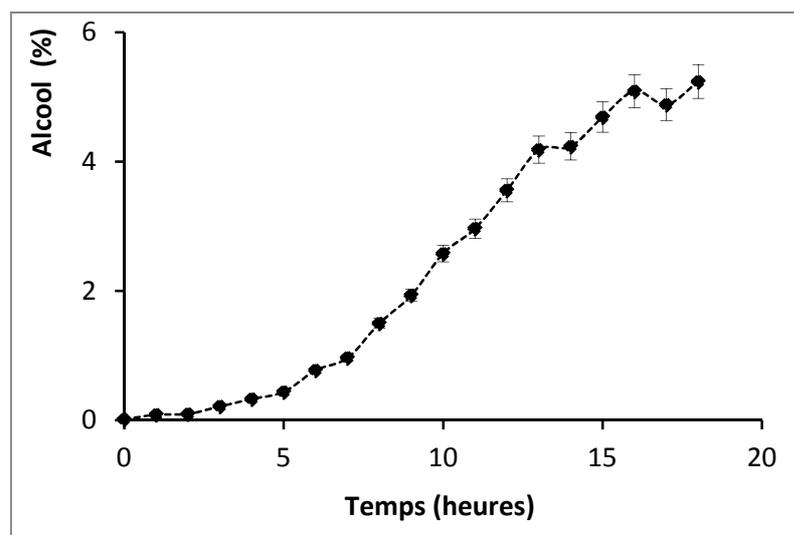


Fig. 7. Evolution de la teneur en alcool du moût de sorgho durant les dix-heures de fermentation discontinue

4 DISCUSSION

Afin d'extirper des données aberrantes issues des paramètres biochimiques relatives à certains essais de fermentation discontinue, le PARAFAC a été utilisé. L'analyse de PARAFAC a montré que les points relatifs aux différents essais de fermentation alcoolique du moût de sorgho délimités par l'ellipse d'intervalle de confiance 95 %, évoluent de la même façon. Néanmoins, il existe des légers décalages observés entre les différents essais de fermentation discontinue (points) représentés dans l'ellipse d'intervalle de confiance 95 %. Ces légers décalages pourraient être attribués aux conditions initiales de fermentation. En effet, il est à souligner que les essais de fermentation discontinue du moût de sorgho se sont déroulées dans les conditions du laboratoire c'est-à-dire dans le milieu ambiant (25-32 °C), sans fixation par exemple de la température qui est un facteur environnemental. Ce facteur environnemental pourrait être à l'origine de l'existence des légers décalages observés entre les essais de fermentation. En effet, la température de la fermentation a une influence sur le processus de fermentation alcoolique [11]. Deux essais de fermentation discontinue du moût de sorgho ont constitué des essais aberrants dans la mesure où ces deux essais sont en dehors de l'ellipse à intervalle de confiance 95 %. Les mesures obtenues de ces essais de fermentation discontinue du moût de sorgho ont été extirpées de la base de données.

Dans cette étude, les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques et microbiologiques notamment le pH, la température, l'extrait sec réfractométrique (substrat), la biomasse, le dioxyde de carbone dégagé et l'alcool produit (éthanol) ont été déterminées au cours du temps de fermentation. Le pH du moût de sorgho en fermentation demeure statistiquement identique durant la fermentation ($P < 0,05$) et le moût de sorgho en fermentation reste acide jusqu'à la fin de la fermentation. Des résultats similaires ont été enregistrés dans le moût de sorgho au Bénin, avec un pH de l'ordre de 3 en fin de fermentation à 25 °C [12]. Cette faible valeur de pH offre la garantie que la plupart des microorganismes pathogènes ne peuvent proliférer dans le milieu [13]. Par ailleurs, le caractère acide du moût sucré de sorgho en fermentation est relatif à la phase de fermentation lactique. En effet, la production du moût sucré de sorgho nécessite une phase importante de fermentation lactique spontanée au cours desquelles les bactéries lactiques notamment les genres *Lactobacillus*, *Leuconostoc* et *Pediococcus* produisent des acides organiques [14], [15]. Ainsi, la fermentation alcoolique initiée par les ferments traditionnels est essentiellement assurée par les levures [13]. Au cours de celle-ci, l'activité des bactéries lactiques est généralement négligeable. Cela signifie que les acides organiques produits pendant la phase d'aigrissement subissent très peu de modification pendant la fermentation alcoolique du moût de sorgho. Le caractère acide du moût de sorgho en fermentation serait donc lié à la présence d'acides organiques dont les principaux sont l'acide oxalique, l'acide lactique, l'acide tartrique, l'acide malique et l'acide citrique [16]. De même, il a été remarqué que la température du moût de sorgho en fermentation évolue progressivement du début à la neuvième heure de fermentation où elle atteint sa valeur moyenne maximale (32,50 (± 0,69) °C), puis décroît en fin de fermentation à une valeur moyenne de 30,41 (± 0,5) °C. Par ailleurs, l'analyse statistique a montré que les valeurs moyennes de la température du moût de sorgho en fermentation sont statistiquement différentes ($P < 0,05$). Ces valeurs moyennes de la température du moût de sorgho en fermentation sont inférieures à celles observés par Djè et al. [17]. Selon ces auteurs, les valeurs moyennes de la température durant la fermentation alcoolique lors de la production de cette même bière dans trois sites d'Abidjan diminuent de façon générale d'une valeur moyenne de 39,3 (± 0,8) °C en début de fermentation à une valeur moyenne de 34,6 (± 0,8) °C en fin

de fermentation. Par ailleurs, la valeur moyenne maximale de la température ($32,50 \pm 0,69$ °C) du moût de sorgho en fermentation obtenue est légèrement supérieure à la valeur moyenne maximale de la température (32 °C) de production du "bili bili", une bière traditionnelle du Tchad [18]. Les variations de la température du moût de sorgho seraient dues aux réactions biochimiques qui ont lieu pendant le processus de fermentation discontinue. En effet, la fermentation est un processus catabolique produisant de l'énergie dont une partie est conservée sous forme d'ATP et l'autre est dissipée sous forme de chaleur [19]. Cette production d'énergie pourrait avoir comme conséquence, la modification de la température du moût de sorgho en fermentation.

L'analyse des valeurs moyennes de la biomasse, de l'extrait sec réfractométrique, du dioxyde de carbone dégagé et d'alcool produit a montré que ces quatre paramètres de fermentation présentent des fortes variations au cours du processus de fermentation discontinue du moût de sorgho. Pendant que les quantités de l'extrait sec réfractométrique (substrat) diminuent considérablement au cours du temps de fermentation, les quantités de dioxyde de carbone et d'alcool augmentent progressivement. Ce phénomène a été observé au niveau des travaux réalisés par N'Guessan *et al.* [16]. Les résultats des travaux de ces auteurs ont révélé une diminution de l'extrait sec réfractométrique (substrat) et une augmentation du dioxyde de carbone et de l'alcool au cours du temps de fermentation quelle que soit la quantité d'inoculum utilisée pour assurer la production du "tchapalo" (bière traditionnelle à base de sorgho). Cela vient confirmer le fait qu'au cours de la fermentation alcoolique la consommation du substrat (des sucres) conduit à la production des composés volatils (dioxyde de carbone) et de l'alcool. Plus le substrat est dégradé, plus la proportion d'alcool du moût de sorgho augmente, atteignant dans cette étude une valeur moyenne égale à 5,24 %. Cette valeur alcoolique moyenne (5,24 %) enregistrée en dix-huit heures de fermentation est supérieure à celle (4,05 %) de la bière traditionnelle à base de sorgho du Togo obtenue après trente-six heures de fermentation [20]. Une valeur de l'ordre de 4,8 % d'alcool a été enregistrée au Bénin, dans le moût de sorgho après sept jours de fermentation à 25 °C [12]. Contrairement aux teneurs en substrat (extrait sec réfractométrique), l'évolution de la biomasse au cours du temps de fermentation alcoolique du moût, présente plusieurs phases. Ces différentes phases d'évolution des valeurs moyennes de la biomasse s'apparentent à celles des travaux de Blanch et Clark [21], dans le cas de la croissance d'une population microbienne en milieu non renouvelé. Par ailleurs, les différentes variations observées au niveau des paramètres physico-chimiques et microbiologiques signifient que ceux-ci sont en modification perpétuelle durant le processus de fermentation discontinue du moût de sorgho.

5 CONCLUSION

Cette étude a enfin montré clairement que le pH, la température, l'extrait sec réfractométrique, la biomasse, le CO₂ dégagé et l'alcool produit (éthanol) évoluent différemment au cours du temps de fermentation discontinue du moût de sorgho. Ces paramètres de fermentation présentent des variations au cours du temps de fermentation. Par ailleurs, la maîtrise de ces paramètres pourrait constituer une avancée notable pour une industrialisation de la fabrication du tchapalo qui est une bière dont la consommation est croissante.

RÉFÉRENCES

- [1] A.K. Yao, N. Kadio, A. Coulibaly & G.N. Agbo. Production du tchapalo à partir du sorgho en Côte d'Ivoire. In: JM Menyonga, T Bezuneh, CC Nwasike, PM Sedogo, A & Tenkouano (Ed). *Processing and industrial utilization of sorghum and related cereal in Africa*, Ouagadougou (Burkina Faso), 22 novembre 1993. Proceeding of the OUA/STRC-SAFGRAD Regional symposium, p 55-60, 1995.
- [2] N.D. Amané. Étude d'une bière de fabrication artisanale « tchapalo » : aspect analytique, aspect sociologique et l'aspect technologique. Thèse de Doctorat Unique. Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire. 200 pp., 2009.
- [3] A.P.P. Kayodé, J.D. Hounhouigan, M. J.R. Nout & A. Niehof. Household production of sorghum beer in Benin: technological and socio-economic aspects in Benin. *International Journal of Consumer Studies*, 5 (2): 1470-6431, 2007.
- [4] Morakul S. Etude et modélisation de la composition du gaz fermentaire en conditions œnologiques : intérêt pour le contrôle de la fermentation. Thèse de Doctorat, Centre International d'Etudes supérieures en sciences Agronomiques, Montpellier SUPAGRO. 132 p., 2011.
- [5] N.D. Amané, N. E. Assidjo, K. Bohoussou, M. A. Gbongué & P. Cardot. Caractérisation physico-chimique d'une bière traditionnelle Ouest Africaine le tchapalo. *Agronomie Africaine*, 17 (2) : 73-162., 2005.
- [6] P. Barbin. Contrôle et éléments de maîtrise de la contamination par la levure *brettanomyces* au cours du procédé de vinification en rouge. Thèse de Doctorat Unique. Institut National Polytechnique, Toulouse, France. 200 pp. 2006.
- [7] D.N. Rutledge & D.J.R Bouveresse. Multiway analysis of outer product arrays using PARAFAC. *Chemometrics Intellect Laboratory System*, 85 (2): 170-178, 2007.

- [8] T. Khayamian. Robustness of PARAFAC and N-PLS regression models in relation to homoscedastic and heteroscedastic noise. *Chemometric Intellect Laboratory System*, 88 (1): 35-40., 2007.
- [9] A.K. Smilde. Three-way analyses: Problems and prospects. *Chemometrics Intellect Laboratory System*, 15 (2-3): 143-157., 1992.
- [10] D.J.R Bouveresse, H. Benabib & D.N. Rutledge. Independent component analysis as a pretreatment method for parallel factor analysis to eliminate artefacts from multiway data. *Analytical Chemistry Acta*, 589 (2) : 216- 224., 2007.
- [11] K.F. N'Guessan, S. Aka, N.T. N'Djéni & K.M. Djè. Influence of alcoholic Fermentation Temperature on Sorghum Beer Quality. *Food Global Science Books*, 2 (2), 119-123., 2008a.
- [12] A.E. Dahouenon; R. G. Degnon, E. S. Adjou ; D. C.K. Sohounhloue. Stabilisation de la bière produite à partir de matières amylacées locales (Sorghum bicolor et Musa acuminata) par adjonction de l'huile essentielle de Cymbopogon citratus, *Journal of Applied Biosciences* 51: 3596 – 3607., 2012.
- [13] S. Aka, N.T. Djéni, K.F. N'guessan, K.C. Yao & K.M. Djé. Variabilité des propriétés physico-chimiques et dénombrement de la flore fermentaire du tchapalo, une bière traditionnelle de sorgho en Côte d'Ivoire. *Afrique Science*, 4 (2) : 274-286. 2008
- [14] C.A Togo, S.B. Feresu & A.N. Mutukumira. Identification of lactic acid bacteria isolated from opaque beer (chibuku) for potential use as a starter culture in Togo. *Journal Food Technology of Africa*, 7 (3): 93-97. 2002.
- [15] H. Sawadogo-Lingani, V. Lei, B. Diawara, D.S. Nielsen, P.L. Moeller, A.S Traoré & M. Jakobsen. The biodiversity of predominant lactic acid bacteria in dolo and pito wort for the production of sorghum beer in Ghana and Burkina Faso. *Journal applied Microbiology*, 103 (4): 765-777. 2007
- [16] K.F N'Guessan, N.T. N'Djéni, T.D. Adjéhi & K.M. Djè. Effect of Traditional starter inoculation rate on Sorghum Beer Quality. *Journal of Food Technology*, 6 (6): 271-277. 2008b.
- [17] M.K Djè, K.F N'Guessan, T.N. Djéni & D.T. Adjéhi. Biochemical changes during alcoholic fermentation in the production of "Tchapalo", a traditional sorghum beer. *International Journal of Food Engeneering*, 4 (7): 1-15. 2008.
- [18] M. Nanadoum, M. Mbaiguinam, C. Gaillardin & J. Pourquoi. Suivi technique, analytique et microbiologique de la « bili bili » bière traditionnelle tchadienne. *Afrique Science*, 2 (1) : 69-82., 2006.
- [19] H. Akin. Evolution du pH pendant la fermentation alcoolique de moûts de raisins : modélisation et interprétation métabolique. Thèse de Doctorat Unique. Institut National Polytechnique, Toulouse, France. 120 pp., 2008.
- [20] J. Périssé, J. Adrian, A. Rerat & S. Le Berre. Bilan nutritif de la transformation du sorgho en bière ; préparation, consommation d'une bière au Togo. *Annales de Nutrition et des aliments*, 12 : 1-15., 1959.
- [21] H. W. Blanch & D.S. Clark. Modeling of a feed-batch fermentation process using Escherichia coli. *Biochemical Engineering Control*, 14 (2) : 3-20., 1997.