

## Optimisation du procédé de fabrication du *tchapalo*, bière traditionnelle ivoirienne par le plan factoriel fractionné

Didier Narcisse AMANE<sup>1\*</sup>, Kan Benjamin KOUAME<sup>2</sup>, Chatigre KOUAME<sup>1</sup> et Emmanuel Nogbou ASSIDJO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de biochimie et sciences des aliments, UFR BIOSCIENCES, Université de Cocody-Abidjan, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>Laboratoire de biochimie et technologie des aliments, Université d'Abobo-Adjamé, UFR/STA, 02 BP 801 Abidjan 02 Côte d'Ivoire

<sup>3</sup>Unité de nutrition et de technologie des aliments du LAPISEN, Département de génie chimique et agroalimentaire, Institut National Polytechnique, B.P. 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

\* Correspondance, courriel : [amannedn@yahoo.fr](mailto:amannedn@yahoo.fr)

### Résumé

Le plan d'expérience, précisément le plan factoriel fractionné a été appliqué sur la méthode de fabrication artisanale du *tchapalo* pour l'amélioration du procédé. Ainsi, après définition du domaine expérimentale, le criblage des facteurs a mis en exergue l'importance de la phase du brassage, notamment les étapes de décantation, de cuisson et de pré-cuisson qualifiées de points critiques. Il a également permis l'obtention d'un système d'équation appelé modèle mathématique dont la résolution a défini les conditions améliorées de la fabrication artisanale du *tchapalo*. Par ailleurs, ces conditions permettent un gain de temps allant jusqu'à 5140 min, soit 3j 13h 40min. Les coefficients de variation largement inférieurs à 15 % permettent de valider le modèle mathématique dans son domaine expérimental défini.

**Mots-clés :** *sorgho, tchapalo, fabrication, optimisation, plan factoriel fractionné, physico-chimie.*

### Abstract

**Optimization of the process of manufacture of the *tchapalo*, traditional beer of the Ivory Coast by the fractional factorial plan**

The plan of experience, precisely the fractional factorial plan has been applied on the method of artisanal manufacture of the *tchapalo* for the improvement of the process. Thus, after definition of the experimental domain, the sifting of the factors put in inscription the importance of the phase of the brewing, notably the qualified stages of decanting, cooking and meadow cooking of critical points. It also permitted the obtaining of an equation system named mathematical model whose resolution defined the conditions improved of the artisanal manufacture of the *tchapalo*. Otherwise, these conditions permit an active time gain until 5140 min, either 3j 13h 40min. The extensively lower coefficients of variation to 15% permit to validate the mathematical model in its definite experimental domain.

**Keywords :** *sorghum, tchapalo, manufacture, optimization, fractional factorial plan, physico-chemistry.*

## 1. Introduction

Les bières sont des boissons alcoolisées les plus prisées dans le monde, car elles sont produites aussi bien dans les pays développés que dans les pays sous-développés [1]. Elles répondent à des besoins physiologiques, psychologiques et sociologiques. En effet, elles dissipent la fatigue et la dépression, procurent l'évasion, conduisent à l'euphorie, facilitent la communication et créent la fête [2]. En Côte d'Ivoire, la Société de limonaderie et de brasserie d'Afrique (SOLIBRA) qui produit la bière industrielle nationale détient plus de 50 % de part de marché Ivoirien avec un chiffre d'affaire de plus de 100 milliard pour une production de 1,3 million d'hectolitre [3]. L'autre part du marché Ivoirien est partagée par les bières importées et la bière de fabrication artisanale appelée *tchapalo*. Vue l'importance du marché, l'amélioration en qualité et en quantité du *tchapalo* pourrait faire de la production de cette bière fabriquée artisanalement, une activité de rentée de devise au détriment des bières importées.

Jadis produit au Nord de la Côte d'Ivoire, le *tchapalo* est toujours fabriqué de manière artisanale sur toute l'étendue du pays avec une consommation croissante [4]. Malgré la prolifération des sites de production, les conditions de sa fabrication n'évoluent guère [5]. Les brasseuses sont confrontées aux difficultés de production, de conservation et de reproductibilité du *tchapalo*. Concernant la non reproductibilité, les travaux d'Amané et collaborateurs [6] ont permis de mettre en relief la variation des caractéristiques physico-chimiques de cette bière d'un site de production à un autre. Cette variation se fait remarquer également au sein même d'un site de production lorsqu'il s'agit de la production antérieure par rapport à celle du jour.

Au niveau de la production, les brasseuses estiment que le procédé de fabrication est pénible et long à exécuter [5]. Face à ces difficultés technologiques rencontrées par celle-ci, il a été appliqué les plans d'expériences sur le procédé de fabrication afin de l'optimiser. A cet effet, les facteurs estimés importants (matières premières, étapes et conditions de fabrication) seront étudiés. Le plan factoriel fractionné sera utilisé pour évaluer l'influence de ces facteurs sur le procédé de fabrication et proposer les conditions optimales de production du *tchapalo*.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Matériel

Le plan factoriel fractionné a été appliqué au procédé de fabrication de *tchapalo* à l'aide des logiciels office Excel 2000 (Microsoft, Redmond, WA, USA) et Matlab 4.0 (Matlab In, USA). A cet effet, plusieurs essais de production de *tchapalo* ont été réalisés selon le diagramme de fabrication du *tchapalo* proposé par les brasseuses de la ville de Yamoussoukro, capitale politique de Côte d'Ivoire [6]. Ce diagramme est présenté à la **Figure 1**. Les différents *tchapalos* obtenus ont fait l'objet d'analyse physico-chimique pour obtenir les réponses  $Y_x$ .

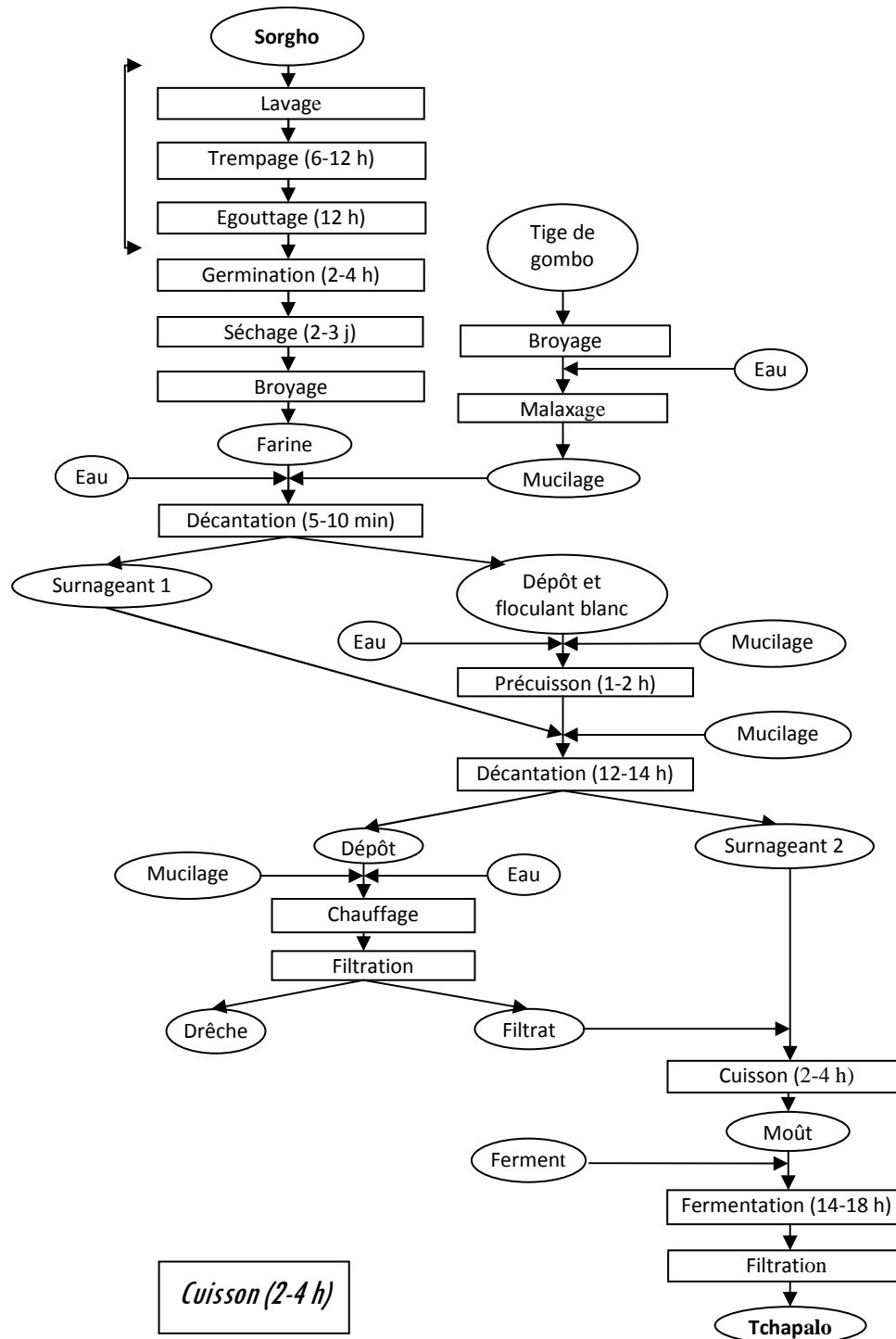


Figure 1 : Diagramme de fabrication du tchapalo utilisé dans la ville de Yamoussoukro

2-2. Méthodes

2-2-1. Le plan factoriel fractionné

- *Le domaine expérimental*

Le domaine expérimental d'étude présenté au **Tableau 1** est constitué de facteurs sélectionnés selon les travaux des auteurs [7-9] qui ont montrés leur importance. Ces facteurs sont les étapes de la germination, de la précuisson, de la cuisson et de la fermentation.

**Tableau 1 : Définition du domaine expérimental du plan factoriel fractionné**

Facteurs principaux (X)	Niveaux	
	Bas (-1)	Haut (+1)
X <sub>1</sub> : Durée de trempage	12 h	24 h
X <sub>2</sub> : Durée de germination	48 h	73 h
X <sub>3</sub> : Durée de séchage	5 h	10 h
X <sub>4</sub> : Durée de décantation	0 min	30 min
X <sub>5</sub> : Durée de précuisson	0 h	1 h
X <sub>6</sub> : Durée de cuisson	1 h	2 h
X <sub>7</sub> : Type de ferment utilisé	FS	SAC
X <sub>8</sub> : Température de fermentation	TA	40 °C

SAC : *Saccharomyces cerevisiae* ; FS : Ferment sauvage ; TA : Température ambiante

D'autres étapes ont été également sélectionnées sur la base de leur influence sur une étape. Il s'agit du trempage qui favorise l'humidité appropriée à la germination et du séchage qui met fin à la germination [1]. La décantation par contre permet la séparation entre le dépôt et le surnageant pendant le brassage. Chaque facteur retenu est présenté avec son niveau bas et haut. Après avoir aliasé les facteurs X<sub>7</sub> et X<sub>1,2,3,4,5</sub> puis X<sub>8</sub> et X<sub>2,3,4,5,6</sub>, le plan factoriel fractionné présente la liste de 2<sup>8-2</sup> essais, soit 64 expériences à réaliser. Le tableau de Yates accompagnant ce plan est présenté au **Tableau 2**. Il est établi par une alternance des signes (-) et (+) pour chaque facteur. Le premier facteur est une alternance de un en un, le deuxième de deux en deux, le troisième de quatre en quatre, et enfin le huitième de 2<sup>8-1</sup> en 2<sup>8-1</sup>.

**Tableau 2 : tableau de Yates du plan factoriel fractionné**

Expériences	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>
1	12	48	5	0	0	1	FS	TA
2	24	48	5	0	0	1	SAC	TA
3	12	72	5	0	0	1	SAC	40
4	24	72	5	0	0	1	FS	40
5	12	48	10	0	0	1	SAC	40
6	24	48	10	0	0	1	SAC	40
7	12	72	10	0	0	1	FS	TA
8	24	72	10	0	0	1	SAC	TA
9	12	48	5	30	0	1	SAC	40
10	24	48	5	30	0	1	SAC	TA
11	12	72	5	30	0	1	FS	TA
12	24	72	5	30	0	1	SAC	TA
13	12	48	10	30	0	1	FS	TA
14	24	48	10	30	0	1	SAC	TA
15	12	72	10	30	0	1	SAC	40
16	24	72	10	30	0	1	FS	40
17	12	48	5	0	1	1	SAC	TA
18	24	48	5	0	1	1	FS	40
19	12	72	5	0	1	1	FS	TA
20	24	72	5	0	1	1	SAC	TA
21	12	48	10	0	1	1	FS	TA
22	24	48	10	0	1	1	SAC	TA
23	12	72	10	0	1	1	SAC	TA
24	24	72	10	0	1	1	FS	40
25	12	48	5	30	1	1	FS	TA
26	24	48	5	30	1	1	SAC	TA
27	12	72	5	30	1	1	SAC	40
28	24	72	5	30	1	1	SAC	40
29	12	72	10	30	1	1	SAC	40
30	24	48	10	30	1	1	FS	40
31	12	72	10	30	1	1	FS	TA
32	24	72	10	30	1	1	SAC	TA
33	12	48	5	0	0	2	FS	40
34	24	48	5	0	0	2	SAC	40
35	12	72	5	0	0	2	SAC	TA
36	24	72	5	0	0	2	FS	TA
37	12	48	10	0	0	2	SAC	TA
38	24	48	10	0	0	2	FS	TA
39	12	72	10	0	0	2	FS	40
40	24	72	10	0	0	2	SAC	40
41	12	48	5	30	0	2	SAC	TA
42	24	48	5	30	0	2	FS	TA
43	12	72	5	30	0	2	SAC	40
44	24	72	5	30	0	2	SAC	40
45	12	48	10	30	0	2	FS	40
46	24	48	10	30	0	2	SAC	40
47	12	72	10	30	0	2	SAC	TA
48	24	72	10	30	0	2	FS	TA
49	12	48	5	0	1	2	SAC	TA
50	24	48	5	0	1	2	FS	TA
51	12	72	5	0	1	2	FS	40
52	24	72	5	0	1	2	SAC	40
54	24	48	10	0	1	2	SAC	40
55	12	72	10	0	1	2	SAC	TA
56	24	72	10	0	1	2	FS	TA
57	12	48	5	30	1	2	FS	40
58	24	48	5	30	1	2	SAC	40
59	12	72	5	30	1	2	SAC	TA
60	24	48	10	30	1	2	SAC	TA
61	12	48	10	30	1	2	SAC	TA
62	24	48	10	30	1	2	FS	TA
63	12	72	10	30	1	2	FS	40
64	24	72	10	30	1	2	SAC	40

La matrice des expériences a été établie en remplaçant les valeurs codées (-1 ou +1) du tableau de Yates par les valeurs réelles des niveaux des facteurs, présentées dans le tableau du domaine expérimental [10].

Cette matrice des 64 expériences est présentée dans le **Tableau 3**. Le tirage aléatoire a permis d'effectuer les essais dans l'ordre suivant : 23-32-41-12-54-21-19-53-35-24-62-56-18-8-27-55-25-10-52-20-28-38-63-22-44-17-34-31-06-64-61-30-01-29-33-25-15-13-60-03-48-11-42-58-14-46-40-47-16-02-59-04-49-07-43-51-45-57-09-50-39-05-36-37.

**Tableau 3 : Matrice des 64 essais du plan factoriel fractionné**

Expériences	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
4	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
5	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
7	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
10	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
12	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
13	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1
14	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
15	-1	1	1	1	-1	-1	1	1
16	1	1	1	1	-1	-1	-1	1
17	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
18	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
19	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
20	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1
21	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1
22	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
23	-1	1	1	-1	1	-1	1	1
24	1	1	1	-1	1	-1	-1	1
25	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1
26	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1
27	-1	1	-1	1	1	-1	1	1
28	1	1	-1	1	1	-1	-1	1
29	-1	-1	1	1	1	-1	1	1
30	1	-1	1	1	1	-1	-1	1
31	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
32	1	1	1	1	1	-1	1	-1
33	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1
34	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
35	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
36	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
37	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1
38	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1
39	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
40	1	1	1	-1	-1	-1	1	1
41	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
42	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
43	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
44	1	1	-1	1	-1	-1	1	1
45	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
46	1	-1	1	1	-1	-1	1	1
47	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1
48	1	1	1	1	-1	-1	1	-1
49	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
50	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
51	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1
52	1	1	-1	-1	1	1	1	1
53	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1
54	1	-1	1	-1	1	1	1	1
55	-1	1	1	-1	1	1	1	-1
56	1	1	1	-1	1	1	-1	-1
57	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1
58	1	-1	-1	1	1	1	1	1
59	-1	1	-1	1	1	1	1	-1
60	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
61	-1	-1	1	1	1	1	1	-1
62	1	-1	1	1	1	1	1	-1
63	-1	1	1	1	1	1	-1	1
64	1	1	1	1	1	1	1	1

$X_7 \equiv X_{12345}$  et  $X_8 \equiv X_{23456}$

(X<sub>7</sub> et X<sub>8</sub> sont les facteurs aliasés)

• **Criblage des facteurs**

Pour chaque essai de fabrication, le tchapalo obtenu fait l'objet d'analyse physico-chimique afin d'obtenir les réponses mesurables telles que la teneur en alcool (Y<sub>1</sub>), l'extrait sec réfractométrique (Y<sub>2</sub>), le pH (Y<sub>3</sub>), la teneur en matière sèche (Y<sub>4</sub>) et la densité (Y<sub>5</sub>). A l'aide du résultat de chaque réponse, les coefficients attachés à chaque effet de facteurs principaux et d'interactions sont calculés par la méthode de régression linéaire multiple grâce au logiciel Office Excel 2000. Le choix des facteurs influents est fait par le test de signification du coefficient. En effet, les coefficients sélectionnés sont ceux dont la valeur absolue est supérieure au double de l'écart-type expérimental (2S<sub>e</sub>). L'écart-type est déduit de trois répétitions d'un essai [11]. Par ailleurs, les coefficients significatifs et les facteurs correspondants ont permis d'établir une équation mathématique pour chaque réponse, soit cinq équations.

• **Détermination des niveaux optimums**

Pour déterminer de manière théorique, les meilleures conditions de préparation du tchapalo symbolisées par les niveaux optimums des facteurs, les cinq équations mathématiques ont été regroupées pour en faire un système d'équation appelé modèle mathématique. En tenant compte de l'objectif et des contraintes définies, la résolution de ce système a été effectuée avec le solveur du logiciel Office Excel 2000 et le

logiciel Matlab 4. Les travaux d'AMANE [13] effectués au niveau sensoriel permettent de définir l'objectif suivant. Le tchapalo est d'autant meilleurs que la densité ( $Y_5$ ), la teneur en matière sèche ( $Y_4$ ), le pH ( $Y_3$ ) et la quantité de l'ESR ( $Y_2$ ) sont minimisés et que la teneur en alcool ( $Y_1$ ) est maximisée. La contrainte qui suit consiste à maintenir les facteurs ( $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$  et  $X_8$ ) dans les intervalles des niveaux haut et bas (-1 et +1).

### • Test de validation

Le test de validation du modèle mathématique a été réalisé par la détermination des coefficients de variation entre les valeurs calculées (issues de l'application des valeurs optimales des facteurs à chaque équation) et les valeurs expérimentales de chaque réponse (issues des essais expérimentaux complémentaires des niveaux optimums des facteurs) [11].

### 2-2-2. Analyses physico-chimiques

Les réponses mesurables telles que le pH et l'ESR ont été déterminées selon les méthodes de l'AOAC [12] à l'aide d'un pH-mètre HANNA HI 98240 (HANNA Instruments, Eibar, Espagne) et du réfractomètre d'Abbé OPL N°2.610 (OPL, Paris, France). Quant aux réponses teneur en matière sèche et densité, elles ont été déterminées par gravimétrie à l'aide de la balance SARTORIUS analytic (Sartorius GA, Gottingen, Allemagne). La réponse degré alcoolique a été obtenue selon un dispositif de distillation contenant un thermomètre gradué jusqu'à 100°C et le réfractomètre d'Abbé cité précédemment [6].

## 3. Résultats

Après avoir défini le domaine expérimental et réalisé les 64 essais de la matrice, les valeurs des réponses mesurables sont présentées dans le **Tableau 4**.

**Tableau 4 : Réponses mesurables de 64 essais de la matrice expérimentale**

Expé- riences	Teneur en Alcool ( $Y_1$ en %)	ESR ( $Y_2$ en %)	pH ( $Y_3$ )	Teneur en Matières. ( $Y_4$ en %)	Densité ( $Y_5$ )
1	1	0	3,27	1,09	0,989
2	0	0	3,84	0,09	1,003
3	0	1	3,61	2,2	1,000
4	0	0,50	3,85	1,38	0,99
5	0	2,00	4,03	2,85	1,010
6	0	1,00	3,48	2,36	1,026
7	2,25	1,5	3,43	0,09	0,993
8	0	5,5	3,62	6,64	1,02
9	0	0,5	4	0,29	1,003
10	6	0,75	3,45	8,4	0,999
11	0	0,5	3,41	0,25	0,999
12	0	2	3,61	2,54	1,095
13	2	0,5	4	0,83	1,003
14	0	0	3,52	0,53	0,995
15	0	0	4,1	1,04	1,002
16	3,5	0	3,42	0,23	0,997
17	0	0,5	3,57	1,72	0,997
18	4,5	1,5	3,55	1,94	1,005
19	2,25	5	3,71	6,17	1,01
20	0	1	3,6	1,75	1,009
21	2,25	2,25	3,65	3,85	1,005
22	0	0,5	3,39	1,17	0,98
23	0	2,5	3,97	3,42	1,018
24	2,25	2,75	3,75	3,75	1,008
25	4,75	1	3,41	1,38	1,005
26	0	1,5	3,47	1,35	0,997
27	0	2	3,7	2,63	1,025
28	7	1	3,49	1,6	1,007
29	0	1	3,72	1,02	1,004
30	4,5	0,75	3,31	1,07	1,006
31	2,25	2	3,55	2,77	0,993
32	0	0,75	3,73	2,15	1,013
33	0	1	3,35	2,07	1,007
34	0	2	3,57	2,02	0,994
35	0	5	3,41	10,9	1,03
36	5,75	0,5	3,55	1,55	0,995
37	4,75	0,25	3,75	0,96	1,01
38	1	3	3,48	3,72	1,006
39	4	1,5	3,8	2,62	1,008
40	0	1	3,45	1,5	1,004
41	0	2	3,85	4,14	1,098
42	0	2,5	3,6	2,41	0,991
43	2,75	0,75	3,41	1,12	1,005
44	0	0,75	3,65	2,42	0,997
45	2,25	1	3,62	1,9	1,003
46	0	1	3,44	5,62	1,001
47	0	1,5	3,63	1,66	1,008
48	2,5	0,5	3,55	0,83	1,002
49	4,5	7	3,88	7,65	1,001
50	4,75	6,5	3,72	6,35	0,991
51	2	2,5	3,44	4,37	1,009
52	3,5	2	4,07	2,81	0,979
54	0	5,5	3,9	11,26	0,9
55	0	15,01	3,6	8,47	1,26
56	0	1,75	3,83	2,9	1,001
57	0	3,75	3,51	4,71	1,007
58	2,75	5	3,47	4,24	1,001
59	0	6	3,6	6,71	0,988
60	0	10	3,76	10,64	1,05
61	4,75	7	4,01	5,55	1,062
62	7,25	7,5	4,11	5,47	1,084
63	1	5,15	3,8	7,83	1,05
64	9,5	9	3,75	9,2	1,07

**3-1. Criblage des facteurs**

Pour chaque réponse, les coefficients des effets principaux et d'interactions des facteurs calculés sont présentés au **Tableau 5**. Ceux qui sont en valeur absolue, supérieurs au double de l'écart type sont retenus comme coefficients significatifs. Ces coefficients significatifs sont utilisés pour établir l'équation mathématique liée à chaque réponse.

**Tableau 5 : Coefficients des effets principaux et d'interactions des facteurs attachés à chaque réponse**

	Alcoolique	ESR	pH	MS	Densité		Alcoolique	ESR	pH	MS	Densité
X1	-0,0859	0,2187	0,0283	-0,1241	-0,0004	X124	0,1172	0,0469	-0,0417	-0,3137	-0,001
X2	0,0156	0,25	-0,0033	-0,0634	0,0014	X125	0,0891	-0,1563	-0,0795	0,0162	0,0006
X3	-0,0781	-0,1563	0,0555	-0,0313	-0,001	X126	0,1875	-0,1172	-0,0133	-0,34	-0,0008
X4	0,2812	-0,3125	-0,2402	-0,175	-0,0018	X127	0,4063	-0,1875	0,0314	0,0363	-0,001
X5	0,5	0,7656	-0,1142	1,015	0,0019	X128	-0,5938	-0,1953	-0,0042	-0,1734	0
X6	0,2891	0,6016	0,1102	1,2556	-0,0018	X134	-0,0078	0,1094	-0,0936	-0,4572	0,002
X7	-1,0547	0,1563	0,1227	0,0575	0,0003	X135	-0,0859	-0,0313	-0,0545	-0,0847	0,0007
X8	0,0234	-0,0391	-0,1883	-0,0372	-0,003	X136	-0,3438	0,1484	-0,0008	0,2909	-0,0004
X12	0,2187	-0,2344	0,0089	-0,4153	-0,0004	X137	0,25	0,0312	-0,0242	0,7666	0,0002
X13	-0,5938	-0,2344	0,0755	0,2506	0,0001	X138	0	0,0391	-0,0836	-0,6769	0,0002
X14	-0,0469	-0,0781	-0,0555	0,3106	-0,0002	X145	-0,3672	-0,2344	0,0623	-0,1666	-0,0001
X15	-0,0781	0,125	0,0686	-0,3812	0,0015	X146	-0,4531	-0,0547	0,0242	-0,0009	0,0013
X16	-0,4297	0,0859	-0,0564	-0,2912	0,003	X147	0	0,125	-0,0542	-0,0641	0,0019
X17	-0,3203	0,1719	-0,0442	-0,1387	0,0028	X148	0,0813	0,1328	0,0095	0,1956	0,0005
X18	0,3359	-0,0391	0,062	0,2378	-0,0009	X156	-0,1563	0,1328	0,1183	0,2972	-0,0009
X23	0,0234	-0,0156	-0,0345	-0,2519	-0,001	X157	-0,0313	0,0625	0,0567	0,2859	-0,0017
X24	0,0391	0,0625	-0,0345	-0,0381	0,0002	X158	0,2969	0,0703	-0,1552	-0,12	0,0005
X25	-0,1016	-0,1563	0,012	0,0087	-0,0009	X236	-0,2422	-0,0547	-0,0323	-0,3816	-0,0004
X26	0,1875	0,0703	0,0239	-0,3344	-0,0001	X238	0,3047	0,2422	-0,0489	0,295	0,001
X27	-0,4219	-0,0312	0,053	0,39	-0,0009	X246	0,1484	-0,0859	-0,0605	0,3366	0,0006
X28	0,4375	-0,2109	0,0511	-0,4472	-0,0016	X248	-0,0391	-0,0234	-0,0164	0,1925	-0,0003
X34	0,2891	-0,0938	-0,0614	-0,2253	0	X256	-0,1328	-0,0703	0,0311	-0,3916	0,0008
X35	-0,2891	-0,2344	0,0158	0,2653	-0,0003	X258	0,4297	-0,0391	-0,0323	0,2931	0,0016
X36	0,125	-0,1328	0,0427	0,0008	0,0006	X1236	-0,1797	-0,1016	0,0473	-0,2522	-0,001
X37	0,2031	0,0937	0,0111	-0,2547	-0,0016	X1238	-0,1016	0,0859	0,0189	-0,1625	0,0012
X38	0	0,0547	-0,0283	0,5219	0,0005	X1246	-0,1328	-0,2734	-0,0195	0,1109	-0,0017
X45	0,2734	0,125	0,0899	0,0697	0,0006	X1248	-0,1953	0,1484	-0,0036	-0,2713	0,0016
X46	-0,2031	0,1172	0,0464	0,2122	-0,0008	X1256	-0,1016	-0,0367	0,0364	0,1472	-0,0009
X47	-0,4531	0,1406	0,0198	0,0647	-0,0008	X1258	0,0234	-0,1953	0,0348	0,1913	0,0003
X48	0,4063	0,0078	0,0348	0,1144	-0,0003	X1678	1,6797	3,8125	3,7155	3,3978	1,0003
X56	0,0312	0,2266	-0,0214	0,7984	0,0003						
X57	-0,1719	0,1875	-0,1186	-0,3972	0,0005	Se1	0,166	0,103	0,0215	0,0750	0,0006
X58	0,0469	0,0859	0,1133	-0,0306	0,001	2*Se	0,333	0,2061	0,0430	0,1501	0,0013
X123	-0,1484	-0,0781	0,0083	0,3775	-0,0012						

• **Teneur en alcool**

Selon le **Tableau 6**, nous distinguons les coefficients significatifs de signe positifs et négatifs ( $a_5$ ;  $a_7$ ;  $a_{267}$ ;  $a_{2457}$ ) montrant l'influence des facteurs et des interactions correspondants. L'équation mathématique qui en découle est la suivante :

$$Y_1 = 1,6797 + 0,5 X_5 - 1,0547 X_7 - 0,5938 X_{267} - 0,5938 X_{2457} \quad (1)$$

**Tableau 6 : Coefficients significatifs pour la réponse "teneur en alcool"**

Confusions	Effets confondus	Valeurs	Coefficients retenus
$a_0$	$a_0 + a_{123457} + a_{234568}$	1,6797	$a_0$
$a'_5$	$a_5 + a_{12347} + a_{15678} + a_{23468}$	0,5000	$a_5$
$a'_7$	$a_7 + a_{168} + a_{12345} + a_{2345678}$	-1,0547	$a_7$
$a'_{128}$	$a_{128} + a_{267} + a_{13456} + a_{34578}$	-0,5938	$a_{267}$
$a'_{13}$	$a_{13} + a_{2457} + a_{3678} + a_{124568}$	-0,5938	$a_{2457}$

- **Quantité d'extrait sec réfractométrique (ESR)**

Les coefficients significatifs des effets principaux et d'interactions de signe positifs et négatifs ( $a_2$  ;  $a_4$  ;  $a_5$  ;  $a_6$  ;  $a_{456}$  ;  $a_{3567}$ ) sont présentés dans le **Tableau 7**. L'expression mathématique de l'influence des facteurs et des interactions sur l'ESR du tchapalo est l'équation suivante :

$$Y_2 = 3,8125 + 0,25 X_2 - 0,3125 X_4 + 0,7656 X_5 + 0,6016 X_6 + 0,2422 X_{456} - 0,2734 X_{3567} \quad (2)$$

**Tableau 7 : Coefficients significatifs pour la réponse "ESR"**

confusions	effets		Valeurs	Coefficients retenus
	confondus			
$a'_0$	$a_0 + a_{1678} + a_{123457} + a_{234568}$		3,8125	$a_0$
$a'_2$	$a_2 + a_{12678} + a_{13457} + a_{34568}$		0,2500	$a_2$
$a'_4$	$a_4 + a_{12357} + a_{14678} + a_{23568}$		-0,3125	$a_4$
$a'_5$	$a_5 + a_{12347} + a_{15678} + a_{23468}$		0,7656	$a_5$
$a'_6$	$a_6 + a_{178} + a_{23458} + a_{1234567}$		0,6016	$a_6$
$a'_{238}$	$a_{238} + a_{456} + a_{12367} + a_{14578}$		0,2422	$a_{456}$
$a'_{1246}$	$a_{1246} + a_{1358} + a_{2478} + a_{3567}$		-0,2734	$a_{3567}$

- **pH**

Les coefficients significatifs des effets principaux et d'interactions de signe négatif ( $a_4$  ;  $a_5$  ;  $a_8$  ;  $a_{23478}$  ;  $a_{234678}$ ) et positif ( $a_6$  ;  $a_7$  ;  $a_{1567}$  ;  $a_{12348}$ ) des facteurs sont présentés dans le **Tableau 8**. L'équation mathématique qui en découle est la suivante :

$$Y_3 = 3,7155 - 0,2402 X_4 - 0,1142 X_5 + 0,1102 X_6 + 0,1227 X_7 - 0,1883 X_8 + 0,1133 X_{1567} + 0,1183 X_{12348} - 0,1552 X_{23478} - 0,1186 X_{234678} \quad (3)$$

**Tableau 8 : Coefficients significatifs pour la réponse "pH"**

confusions	Effets		Valeurs	Coefficients retenus
	confondus			
$a'_0$	$a_0 + a_{1678} + a_{123457} + a_{234568}$		3,7155	$a_0$
$a'_4$	$a_4 + a_{12357} + a_{14678} + a_{23568}$		-0,2402	$a_4$
$a'_5$	$a_5 + a_{12347} + a_{15678} + a_{23468}$		-0,1142	$a_5$
$a'_6$	$a_6 + a_{178} + a_{23458} + a_{1234567}$		0,1102	$a_6$
$a'_7$	$a_7 + a_{168} + a_{12345} + a_{2345678}$		0,1227	$a_7$
$a'_8$	$a_8 + a_{167} + a_{23456} + a_{1234578}$		-0,1883	$a_8$
$a'_{58}$	$a_{58} + a_{1567} + a_{2346} + a_{123478}$		0,1133	$a_{1567}$
$a'_{156}$	$a_{156} + a_{578} + a_{12348} + a_{23467}$		0,1183	$a_{12348}$
$a'_{158}$	$a_{158} + a_{567} + a_{12346} + a_{23478}$		-0,1552	$a_{23478}$
$a'_{57}$	$a_{57} + a_{1234} + a_{1568} + a_{234678}$		-0,1186	$a_{234678}$



• **Teneur en matière sèche**

La teneur en matière sèche est influencée par les effets principaux et d'interactions des facteurs présentant les coefficients significatifs ( $a_5, a_6, a_{56}, a_{12456}$  et  $a_{1245678}$ ) enregistrés dans le **Tableau 9**. L'équation mathématique traduisant cette influence sur la matière sèche est l'équation suivante :

$$Y_4 = 3,3978 + 1,015 X_5 + 1,2556 X_6 + 0,7984 X_{56} - 0,6769 X_{12456} + 0,7666 X_{1245678} \quad (4)$$

**Tableau 9 : Coefficients significatifs pour la réponse "matière sèche"**

confusions	Effets		Valeurs	Coefficients retenus
	confondus			
$a'_0$	$a_0 + a_{1678} + a_{123457} + a_{234568}$		3,3978	$a_0$
$a'_5$	$a_5 + a_{12347} + a_{15678} + a_{23468}$		1,0150	$a_5$
$a'_6$	$a_6 + a_{178} + a_{23458} + a_{1234567}$		1,2556	$a_6$
$a'_{56}$	$a_{56} + a_{1578} + a_{2348} + a_{123467}$		0,7984	$a_{56}$
$a'_{138}$	$a_{138} + a_{367} + a_{12456} + a_{24578}$		-0,6769	$a_{12456}$
$a'_{137}$	$a_{137} + a_{245} + a_{368} + a_{1245678}$		0,7666	$a_{1245678}$

• **Densité**

Le **Tableau 10** montre les coefficients significatifs des effets principaux et ceux d'interactions ( $a_4, a_5, a_6, a_8, a_{68}, a_{78}, a_{468}, a_{568}, a_{1358}$  et  $a_{12568}$ ) qui sont liés à l'influence de la réponse "Densité". L'équation mathématique résultant de cette influence est la suivante :

$$Y_5 = 1,0003 - 0,0018 X_4 + 0,0019 X_5 - 0,0018 X_6 - 0,003 X_8 + 0,0028 X_{68} + 0,003 X_{78} + 0,0019 X_{468} - 0,0017 X_{568} - 0,0017 X_{1358} + 0,002 X_{12568} \quad (5)$$

**Tableau 10 : Coefficients significatifs pour la réponse "densité"**

confusions	effets		Valeurs	Coefficients retenus
	confondus			
$a'_0$	$a_0 + a_{1678} + a_{123457} + a_{234568}$		1,0003	$a_0$
$a'_4$	$a_4 + a_{12357} + a_{14678} + a_{23568}$		-0,0018	$a_4$
$a'_5$	$a_5 + a_{12347} + a_{15678} + a_{23468}$		0,0019	$a_5$
$a'_6$	$a_6 + a_{178} + a_{23458} + a_{1234567}$		-0,0018	$a_6$
$a'_8$	$a_8 + a_{167} + a_{23456} + a_{1234578}$		-0,0030	$a_8$
$a'_{17}$	$a_{17} + a_{68} + a_{2345} + a_{12345678}$		0,0028	$a_{68}$
$a'_{16}$	$a_{16} + a_{78} + a_{123458} + a_{234567}$		0,0030	$a_{78}$
$a'_{147}$	$a_{147} + a_{235} + a_{468} + a_{1235678}$		0,0019	$a_{468}$
$a'_{157}$	$a_{157} + a_{234} + a_{568} + a_{1234678}$		-0,0017	$a_{568}$
$a'_{1246}$	$a_{1246} + a_{1358} + a_{2478} + a_{3567}$		-0,0017	$a_{1358}$
$a'_{134}$	$a_{134} + a_{257} + a_{12568} + a_{34678}$		0,0020	$a_{12568}$

- (1) réponse "teneur en alcool";  
 (2) réponse "Quantité d'extrait sec réfractométrique"  
 (3) réponse "pH"  
 (4) réponse "teneur en matière sèche"  
 (5) réponse "densité"

La fréquence d'action des facteurs sur les réponses est établie en le pourcentage d'influence. Ainsi, de manière croissante, on cite les facteurs "durées de séchage (5,88 %)", "trempage (11,76 %)", "durée de germination (29,02 %)", "type de ferment (42,35 %)", "température de fermentation (46,27 %)" "durée de décantation (55,69 %)", "durées de cuisson (76,86 %)" et "de précuisson (86,27 %)".

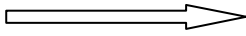
### 3-2. Niveaux optimums

Le système d'équation établi, à l'aide des cinq équations obtenues lors du criblage des facteurs, constitue notre modèle mathématique (6).

$$\begin{cases}
 Y_1 = 1,6797 + 0,5 X_5 - 1,0547 X_7 - 0,5938 X_{267} - 0,5938 X_{2457} \\
 Y_2 = 3,8125 + 0,25 X_2 - 0,3125 X_4 + 0,7656 X_5 + 0,6016 X_6 + 0,2422 X_{456} - 0,2734 X_{3567} \\
 Y_3 = 3,7155 - 0,2402 X_4 - 0,1142 X_5 + 0,1102 X_6 + 0,1227 X_7 - 0,1883 X_8 + 0,1133 X_{1567} + 0,1183 X_{12348} - 0,1552 X_{23478} - 0,1186 X_{234678} \\
 Y_4 = 3,3978 + 1,015 X_5 + 1,2556 X_6 + 0,7984 X_{56} - 0,6769 X_{12456} + 0,7666 X_{1245678} \\
 Y_5 = 1,0003 - 0,0018 X_4 + 0,0019 X_5 - 0,0018 X_6 - 0,003 X_8 + 0,0028 X_{68} + 0,003 X_{78} + 0,0019 X_{468} - 0,0017 X_{568} - 0,0017 X_{1358} + 0,002 X_{12568}
 \end{cases} \quad (6)$$

(6) modèle mathématique

En tenant compte des objectifs et contraintes, la résolution de ce modèle mathématique a donné les résultats enregistrés à la **Figure 2**. Il s'agit des valeurs codées traduites en valeurs réelles. Ces valeurs réelles représentent de manière théorique les meilleures conditions de préparation du tchapalo. Ces conditions optimisées sont : 15 h de trempage, 72 h de germination, 10 h de séchage, 30 min de décantation, 1 h de précuisson, 2 h de cuisson, utilisation de ferment de type sauvage et une température de fermentation de 37 °C.

<i>Valeurs codées</i>		<i>valeurs réelles</i>
$X_1 = -0,556$		$X'_1 = 15 \text{ h}$
$X_2 = 1$		$X'_2 = 72 \text{ h}$
$X_3 = 1$		$X'_3 = 10 \text{ h}$
$X_4 = 1$		$X'_4 = 30 \text{ min}$
$X_5 = 1$		$X'_5 = 1 \text{ h}$
$X_6 = 1$		$X'_6 = 2 \text{ h}$
$X_7 = -1$		$X'_7 = \text{FS}$
$X_8 = 0,484$		$X'_8 = 37 \text{ °C}$

**Figure 2 :** Valeurs codées et leur forme réelle

• **Comparaison**

La comparaison des durées d'exécution entre des conditions habituelles de préparation et celles optimisées, est présentée au **Tableau 11**. L'analyse de ce tableau montre que ces conditions optimisées permettent un gain de temps allant jusqu'à 5140 minutes soit environ 3 j 13 h 40 min.

**Tableau 11 : Durées des étapes de fabrication dans les conditions habituelle et optimisée**

Temps	Condition habituelle	Condition optimisée	Différence des conditions
Trempage	6 à 12 h	15 h	- 540 min à - 180 min
Germination	2 à 4 j	3 j	- 1440 min à + 1440 min
Séchage	2 à 3 j	10 h	+ 2280 min à + 3720 min
Décantation	5 à 10 min	30 min	- 25 min à - 20 min
Précuisson	1 à 2 h	1 h	0 min à + 60 min
Cuisson	2 à 4 h	2 h	0 min à + 120 min
Gain de temps		<b>275 min à 5140 min, soit 4 h 35 min à 3 j 13 h 40 min</b>	
	- perte	+ gain	

**3-3. Test de validation**

Le test de validation du modèle mathématique réalisé à l'aide des réponses théoriques (valeurs calculées) et des réponses mesurées (valeurs expérimentales) donne les résultats enregistrés au **Tableau 12**. De manière générale, les coefficients de variation étant tous inférieurs à 5 %, bien loin de 15 %, le modèle mathématique établi est donc validé dans le domaine expérimental ainsi défini.

**Tableau 12 : Résultat du test de validation du modèle**

Conditions optimisées	$X'_1 = 15 \text{ h} ; X'_2 = 72 \text{ h} ; X'_3 = 10 \text{ h} ; X'_4 = 30 \text{ min} ; X'_5 = 1 \text{ h} ; X'_6 = 2 \text{ h} ; X'_7 = \text{FS} ; X'_8 = 37^\circ\text{C}$				
	$Y_1$ (%)	$Y_2$ (%)	$Y_3$	$Y_4$ (%)	$Y_5$
Réponses					
Valeurs expérimentales	4,62	5,47	3,38	6,94	1,0270
Valeurs calculées	4,42	5,63	3,42	7,05	0,9971
Coefficient de variation (%)	<b>4,525</b>	<b>2,842</b>	<b>1,170</b>	<b>1,560</b>	<b>2,999</b>

**4. Discussion**

Visiblement, toutes les étapes sélectionnées, appelées ici facteurs, ont des niveaux divers d'importance. Selon l'ordre croissant de la fréquence d'apparition, le résultat du criblage des facteurs a montré que les facteurs "séchage", "trempage", et "germination" sont les moins influents car ils ont des pourcentages d'apparition faibles (- 12 %) et ne s'expriment que par leur effet d'interaction. Ces facteurs proviennent de la première grande phase de fabrication du tchapalo appelée maltage. Les suivants qui sont moyennement influents, sont les facteurs "type de ferment" et "température de fermentation". En effet, leur fréquence d'apparition se limite à 56 %. Ces facteurs font partie de la troisième grande phase de fabrication appelée fermentation. Enfin, les facteurs les plus influents sont les étapes de la "décantation", de la "cuisson" et de la "précuisson" avec des

pourcentages d'apparition supérieurs à 75 %. Ces étapes se retrouvent dans la deuxième grande phase de fabrication appelée brassage. Le brassage constitue donc la phase la plus déterminante de la préparation du tchapalo. Compte tenu de leur intérêt, les trois étapes qui font partie de la phase de brassage sont présentées avec leur niveau d'influence. L'étape de décantation occupant la troisième position d'influence, favorise la séparation entre le dépôt constitué de matières non dissoutes et le surnageant liquide contenant les sucres solubles et les enzymes.

L'extraction de ces enzymes est nécessaire pour l'hydrolyse ultérieure de l'amidon [8]. Dans la méthode appliquée à Yamoussoukro, cette étape est accélérée par l'utilisation d'un agent mucilagineux tel que les tiges de gombo. L'étape de précuisson qui est la plus influente, facilite l'action des enzymes sur l'amidon. En effet, l'empois d'amidon obtenu après la précuisson est facilement hydrolysé en dextrines, maltotriose, maltose, et glucose sous l'action enzymatique. A cet effet, BRANDAM et collaborateurs [14] précisent que l'action diastasique de l'enzyme est plus efficace sur l'amidon empesé que sur l'amidon cru. L'obtention de l'empois d'amidon est donc une étape essentielle dans la fabrication du tchapalo, car elle rend aisé la transformation de l'amidon en sucre.

Enfin, l'étape de cuisson qui occupe le deuxième rang d'influence, permet de concentrer le moût dilué en moût sucré par évaporation de l'eau. Cette étape détruit également les microorganismes du moût et favorise la clarification de celui-ci par écumage après coagulation de la matière protéique selon PERISSE et collaborateurs [7]. Au vu de ces différentes étapes, le brassage peut être qualifié de phase critique car il permet l'obtention du moût sucré, nécessaire à la fermentation. C'est pourquoi, pendant la fabrication du tchapalo, une attention particulière est demandée aux brasseuses lors des étapes de cette phase. La nouvelle condition de préparation définie permet un gain de temps allant jusqu'à 3 j 13 h 40 min parce que le temps d'exécution des étapes de germination, de séchage, de précuisson et de cuisson ont été réduits. Ce qui favorise de manière générale la réduction du temps de préparation du tchapalo.

Cet avantage se répercute également sur la réduction des efforts à fournir car certaines actions telles que l'égouttage, le nombre d'étalement et de regroupement des grains pendant le séchage, ne sont plus exécutées ou répétées. Néanmoins, une difficulté apparaît au niveau de la température de fermentation car il faudrait la maintenir à 37 °C durant la fermentation. A cet effet, une cuve de fermentation à moindre coût pourrait être conçue pour ces brasseuses. La validation du modèle mathématique montre bien que la fabrication de manière traditionnelle du tchapalo peut être améliorée par l'optimisation des conditions de préparation lors du maltage, du brassage et de la fermentation.

## 5. Conclusion

L'optimisation de la fabrication artisanale du tchapalo à travers le plan d'expérience, précisément le plan factoriel fractionné a permis de d'identifier les étapes les plus importantes dans le procédé de fabrication du tchapalo à travers le criblage des facteurs. Par ordre croissant, il y a le séchage, le trempage, la germination, le type de ferment, la température de fermentation, la décantation, la cuisson et la précuisson. Cette phase a conduit à l'élaboration d'un modèle mathématique dont la résolution a permis de définir les conditions optimales de préparation de tchapalo. Ces conditions demandent 15 h de trempage, 72 h de germination, 10 h de séchage, 30 min de décantation, 1 h de précuisson, 2 h de cuisson. Elles favorisent l'utilisation de ferment sauvage et une température de 37 °C pour la fermentation. En définitive le plan factoriel fractionné permet effectivement d'optimiser la méthode de fabrication du *tchapalo* et de produire une boisson reproductible lorsque ses conditions sont respectées. Par ailleurs, ses résultats peuvent constituer les bases de données pour une industrialisation de la fabrication du *tchapalo* qui est une bière dont la consommation est croissante [4].

### Références

- [1] - F. BELLARD, "La préparation de bière de sorgho chez les Joohé (Burkina Faso): étude ethnolinguistique d'une technique", *Journal des Africanistes*, 71 (2) (2001) 49-76
- [2] - S. L. ADRIAENS et F. LOZET, "Contribution à l'étude des boissons fermentées indigènes au Rwanda", *Bulletin Agricole du Congo Belge*, Bruxelles, 4 (42) (1951) 933-950
- [3] - P. PERDRIX, "Le marché de la bière Africaine monte en pression", *Jeune Afrique*, N° 2577 du 21 juillet 2008 au 3 août 2008
- [4] - K. A. YAO, K. N'GADI, A. COULIBALY et N. G. AGBO, "Production du *Tchapalo* à partir du sorgho en COTE D'IVOIRE", in *Processing and industrial utilization of sorghum and related cereals in Africa*, Proc. Régional symposium, Ouagadougou, BURKINA-FASO, OAU/STRC-SAFGRAD, 22-26 Nov (1993) 55-60
- [5] - A. COULIBALY, "Etude de la fabrication du tchapalo en vue de l'amélioration", *Rapport de stage CIRI*, (1993) 1-5
- [6] - D. N. AMANE, N. E. ASSIDJO, M. A. GBONGUE, K. BOHOUSSOU et P. CARDOT, " caractérisation physico-chimique d'une bière traditionnelle ouest Africaine : le tchapalo". *Agronomie Africaine XVII* (2) (2005) 73-162
- [7] - J. PERISSE, J. ADRIAN, A. RERAT et S. LE BERRE, "Bilan nutritif de la transformation du sorgho en bière ; préparation, composition, consommation d'une bière du Togo", *Annales de la nutrition et de l'alimentation*, 13 (1959) 1-15
- [8] - S. CHEVASSUS, J. C. FAVIER et A. JOSEPH, "Technologie traditionnelle et valeur nutritive des « bières » de sorgho du Cameroun", *Cahier de nutrition et de diététique*, 11 (2) (1976) 89-104
- [9] - J. J. ASIEDU, "La transformation des produits agricoles en zone tropicale : approche technologique", édition *KARTHALA et CTA*, Wageningen, (1991) 271-278
- [10] - G. SADO, M.C. SADO, "Les plans d'expériences", Ed. *La Defence*, Afnor technique, Paris, (1991)
- [11] - M. FEINBERG, "La validation des méthodes d'analyse : Une approche chimométrique de l'assurance qualité au laboratoire", Edition *Masson*, Paris, (1996) 56-57 [12] - A.O.A.C., *Official Methods of Food Analysis, 19th Edition*, Washington D.C., (1975) 133-176
- [12] - D. N. AMANE, "Contribution à l'étude d'une bière de fabrication artisanale (Tchapalo) : aspects analytique, sociologique et technologique", *Thèse unique de doctorat de l'Université de Cocody*, Côte d'Ivoire, (2009) 72-75
- [13] - C. BRANDAM, X. M. MEYER, J. PROTH, P. STREHAIANO and H. PINGAUD, "An original kinetic model for the enzymatic hydrolysis of starch during mashing", *Biochemical Engineering Journal*, 13 (1) (2003) 43-52